

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

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

Yıl:23 Sayı:46 2024-Güz
Year:23 Vol:46 2024-Fall

Istanbul Commerce University
Journal of Science

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



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Yıl: 23
Year: 23

Sayı: 46
Volume: 46

Güz 2024
Fall 2024

Istanbul Commerce University
Journal of Science



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ











Istanbul Commerce University Journal of Science

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



| | |
|--|---|
| İstanbul Ticaret Üniversitesi Adına Sahibi <i>Owner on behalf of Istanbul Ticaret University</i> | Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>Istanbul Ticaret Üniversitesi Rektörü Rector of Istanbul Ticaret University</i> |
| Editör <i>Editor</i> | Prof. Dr. Berk AYVAZ <i>Istanbul Ticaret University</i> |
| Yardımcı Editör <i>Assistant Editor</i> | Arş. Gör. Dr. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>Istanbul Ticaret University</i> |
| Dil Editörü <i>Language Editor</i> | Assist. Prof. Dr. Elif NURAY YILDIRIM <i>Istanbul Ticaret University</i> |
| Teknik Editör <i>Technical Editor</i> | Prof. Dr. Hanifi PARLAR <i>Istanbul 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>Isparta University of Applied Sciences, Isparta, Türkiye</i> Prof. Dr. Berk AYVAZ <i>Istanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU <i>Istanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>Istanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Prof. Dr. Qamrul Hasan ANSAR <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>Istanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> Dr. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>Istanbul Ticaret University, İstanbul, Türkiye</i> |
| Sorumlu Yazı İşleri Müdürü <i>Publishing Manager</i> | Halil İbrahim BİNİCİ <i>Istanbul Ticaret University</i> |
| Mizanpaj | Emre TOPÇU <i>Istanbul Ticaret University</i> |
| Yönetim Yeri <i>Head Office</i> | İstanbul Ticaret Üniversitesi / <i>Istanbul 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/ticaretfbd |

| | |
|---|--|
| 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 Yayınlanmaktadır <i>Publication Online</i> | ISSN : 1305-7820 E-ISSN : 2587-165X |

| Dizinler / Indexes | | | |
|---|---|---|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  | |  | |

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. 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. Hasan GENÇ | Kimya <i>Chemistry</i> | <i>Van Yüzyüncü 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 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> Biyostatistik / <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 ANSAR | 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. Asif YOKUŞ | Matematik <i>Mathematics</i> | <i>Firat University, Elazığ, Türkiye</i> |
| Assoc. Prof. Dr. Faik GÜRSOY | Matematik <i>Mathematics</i> | <i>Adiyaman University, Adiyaman, Türkiye</i> |
| Assoc. Prof. Dr. Fatih ÖZTÜRK | Endüstri Mühendisliği <i>Industrial Engineering</i> | <i>İstanbul Medeniyet University, İstanbul, Türkiye</i> |
| Assoc. Prof. Dr. Fuat USTA | Matematik <i>Mathematics</i> | <i>Düzce University, Düzce, 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. Cihan KARAKUZU | Bilecik Şeyh Edebali University |
| Prof. Dr. Çiğdem KARABACAK ATAY | Burdur Mehmet Akif Ersoy University |
| Prof. Dr. Farrukh HAFEEZ | University of Birmingham Dubai |
| Prof. Dr. Halit ÖZEN | İstanbul Technical University |
| Prof. Dr. Muhammet GÜL | İstanbul University |
| Prof. Dr. Murat TURKYILMAZ | Trakya University |
| Prof. Dr. Yelda Yalçın GÜRKAN | Tekirdağ Namık Kemal University |
| Assoc. Prof. Dr. Ayşe Neslihan DÜNDAR | Bursa Technical University |
| Assoc. Prof. Dr. Emre ÇAKMAK | İstinye University |
| Assoc. Prof. Dr. Eylem ASMATULU | Wichita State University |
| Assoc. Prof. Dr. Kadriye OKTOR | Kocaeli University |
| Assoc. Prof. Dr. Karahan KARA | İzmir Democracy University |
| Assoc. Prof. Dr. Onur KETENOĞLU | Eskişehir Osmangazi University |
| Assoc. Prof. Dr. Sefa YILDIRIM | Alanya Alaaddin Keykubat University |
| Assoc. Prof. Dr. Sinan TOKLU | Gazi University |
| Assoc. Prof. Dr. Tamer TURGUT | Atatürk University |
| Assist. Prof. Dr. Ahmad Reshad NOORI | İstanbul Gelişim University |
| Assist. Prof. Dr. Aybala YILDIRIM | Marmara University |
| Assist. Prof. Dr. Dragan PAMUCAR | University of Belgrade |
| Assist. Prof. Dr. Emine ÇORUH | Gümüşhane University |
| Assist. Prof. Dr. Esra KUMAŞ | Ostim Technical University |
| Assist. Prof. Dr. Mehmet Rıza ADALI | Sakarya University |
| Assist. Prof. Dr. Muhammed Erdem İSENKUL | İstanbul University-Cerrahpaşa |
| Assist. Prof. Dr. Nükte TOPRAKSEVER | İstanbul Health and Technology University |
| Assist. Prof. Dr. Öznur ŞENGEL | İstanbul Kültür University |
| Assist. Prof. Dr. Ramiz Görkem BİRDAL | İstanbul University-Cerrahpaşa |
| Assist. Prof. Dr. Seda ŞAHİN | Çankırı Karatekin University |
| Assist. Prof. Dr. Serkan ONAR | Yıldız Technical University |
| Assist. Prof. Dr. Yavuz DELİCE | Yalova University |
| Dr. Özgür İNCE | Sivas Cumhuriyet University |
| Dr. Timuçin Alp ASLAN | Çukurova University |
| Dr. Veysel TATAR | Artvin Çoruh University |
| Dr. Zühre AYDIN | Republic of Türkiye Energy Market Regulatory Authority |

EDİTÖRDEN

Değerli İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Okurları,

Dergimizin 23. yılında, 2024 Güz döneminde yayımlanan 46. sayıyı değerli okurlara ulaştırmaktan onur duymaktayız.

Dergimizin bu sayısında Bilgisayar Mühendisliği, Matematik, Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri, Makine Mühendisliği, Kimya, Endüstri Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, Gıda Mühendisliği ve Malzeme Mühendisliği alanlarından on beş makaleyi siz okurlarımızın istifadesine sunmaktan mutluyuz.

Bu sayıda, üniversitemiz içinden ve dışından çalışmalarını bizim aracılığımızla 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 23rd year of our journal, we are honored to share with you our esteemed readers the 46th issue of the Fall 2024 edition.

In this issue, we are pleased to publish fifteen articles from the fields of Computer Engineering, Mathematics, Information and Computing Sciences, Mechanical Engineering, Chemistry, Industrial Engineering, Civil Engineering, Food Engineering and Materials 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/ticaretfbd>.

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

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

- EMPOWERING SELF-DETECTION: A GRAPHICAL USER INTERFACE POWERED BY MACHINE LEARNING FOR EARLY DIAGNOSIS OF ALZHEIMER'S DISEASE** 245
KENDİNE TANIMANIN GÜÇLENDİRİLMESİ: ALZHEİMER HASTALIĞININ ERKEN TANISINA YÖNELİK MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ BİR GRAFİKSEL KULLANICI ARABİRİMİ
Abdullah Talha KABAKUŞ, Pakize ERDOĞMUŞ

- IMAGE MATCHING BASED HAZARDOUS MATERIAL DETECTION AND WARNING SYSTEM** 271
GÖRÜNTÜ EŞLEŞTİRME TABANLI TEHLİKELİ MADDE TESPİT VE UYARI SİSTEMİ
Fatma Betül OKUR, Can EYÜPOĞLU

- SİBER GÜVENLİK ALANINDA NİTELİKLİ İŞ GÜCÜ YETİŞTİRMEK İÇİN BAYRAĞI YAKALA YARIŞMASI YAKLAŞIMI** 292
CAPTURE THE FLAG COMPETITION APPROACH TO EDUCATE QUALIFIED WORKFORCE IN CYBER SECURITY
Cafer ULUÇ, Can EYÜPOĞLU

Matematik / Mathematics

- E-EXACT SEQUENCE AND SOME RESULTS** 319
E-TAM DİZİ VE BAZI SONUÇLAR
Abuzer GÜNDÜZ

Bilgi ve Bilgi İşleme Bilimleri / Information and Computing Sciences

- BİLİŞİM SİSTEMİ GELİŞTİRME SÜRECİ BAŞARISINA İNSAN FAKTÖRÜNÜN ETKİSİNİN İNCELENMESİ** 329
EXAMINING THE EFFECT OF THE HUMAN FACTOR ON THE SUCCESS OF THE INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT PROCESS
Veysel ŞİMŞEK, Vildan ATEŞ

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

- CALIBRATION OF CHABOCHE KINEMATIC HARDENING MODEL PARAMETERS BY OPTIMISATION CHABOCHE** 354
KİNEMATİK PEKLEŞME MODELİ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON İLE KALİBRE EDİLMESİ
Alişan ARASLI, İlyas KACAR

Kimya / Chemistry

- CALCULATION OF HOMA AND BIRD AROMATICITY INDICES, NLO AND NBO PROPERTIES OF BENIDIPINE** 373
BENİDİPİNİN HOMA VE BIRD AROMATİKLİK ENDEKSLERİ, NLO ve NBO ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI
Fatma KANDEMİRLİ, Derya Hilal TUNCEL, Fatma GENÇ

- ŞEHİR ŞEBEKE SULARINDA BULUNAN BAZI AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN TAYİNLERİ İÇİN YÖNTEM GELİŞTİRME: ISPARTA İLİ ÖRNEĞİ** 390
METHOD DEVELOPMENT FOR DETERMINATION OF SOME HEAVY METAL LEVELS IN CITY NETWORK WATER: AN EXAMPLE OF ISPARTA PROVINCE
Ahmet Hakan AKTAŞ, İlknur GENÇER

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

- ELEKTRİKLİ KAMYON SEÇİMİNDE DAİRESEL SEZGİSEL BULANIK KÜMELERE DAYALI VIKOR YÖNTEMİNİN UYGULANMASI** 402
APPLICATION OF VIKOR METHOD BASED ON CIRCULAR INTUITIONISTIC FUZZY SETS IN SELECTING AN ELECTRIFIED TRUCK
Elif ÇALOĞLU BÜYÜKSELÇUK

- DENİZYOLU TAŞIMACILIĞINDA ÜLKELERİN REKABETÇİLİĞİ VE BAYRAK ÇEKMEDE SEÇİM ÖNCELİKLERİ** 428
COMPETITIVENESS OF COUNTRIES IN MARITIME TRANSPORT AND FLAG SELECTION PRIORITIES
Mustafa FİDAN, Pınar GÜROL

- A DECISION SUPPORT MODEL FOR CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT IN MARITIME TRANSPORTATION BASED ON SPHERICAL FUZZY INFORMATION** 462
KÜRESEL BULANIK BİLGİYE DAYALI DENİZ TAŞIMACILIĞINDA SİBER GÜVENLİK RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR KARAR DESTEK MODELİ
Veysel TATAR

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FACTORS INFLUENCING UNIVERSITY STUDENTS' MICROMOBILITY PREFERENCES USING K-NEAREST NEIGHBORS AND LOGISTIC REGRESSION MODELS 488

K- EN YAKIN KOMŞULAR VE LOJİSTİK REGRESYON MODELLERİ KULLANILARAK ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNİN MİKRO-MOBİLİTE TERCIHLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Mahmut Esad ERGİN

Gıda Mühendisliği / Food Engineering

BALIKESİR İLİ YÖRESEL GIDA ÜRÜNÜ “SAVAŞTEPE SARİBEYLER SEFERBERLİK ÇÖREĞİ” YAPIMI VE BAZI KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ 504

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF SOME CHEMICAL PROPERTIES OF "SAVAŞTEPE SARİBEYLER SEFERBERLİK ÇÖREĞİ", A LOCAL FOOD PRODUCT IN BALIKESİR PROVINCEA.

Yavuz YÜKSEL, Mustafa KIRALAN

Malzeme Mühendisliği / Materials Engineering

EFFECT OF HEAT TREATMENT ON WEAR BEHAVIOR OF AISi10Mg ALLOY FABRICATED BY CASTING 516

DÖKÜM İLE ÜRETİLEN AISi10Mg ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞINA ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

Halit ERCAN, Kenan CAN, İbrahim Savaş DALMIŞ

MECHANICAL PROPERTIES OF CLAY/LLDPE AND ORGANOCLAY/LLDPE NANOCOMPOSITES 529

KİL/LLDPE VE ORGANİK KİL/LLDPE NANOKOMPOZİTELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Ebru GÜNİSTER Edgar Alejandro Ayala IRACHETA



EMPOWERING SELF-DETECTION: A GRAPHICAL USER INTERFACE POWERED BY MACHINE LEARNING FOR EARLY DIAGNOSIS OF ALZHEIMER'S DISEASE

KENDİNE TANIMANIN GÜÇLENDİRİLMESİ:
ALZHEİMER HASTALIĞININ ERKEN TANISINA YÖNELİK MAKİNE
ÖĞRENMESİ TEMELLİ BİR GRAFİKSEL KULLANICI ARABİRİMİ

Abdullah Talha KABAKUŞ¹

Pakize ERDOĞMUŞ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.416508>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
talhakabakus@duzce.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
18.01.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
20.04.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
02.05.2024

Abstract

Alzheimer's Disease (AD) is one of the most, if not the most, devastating neurodegenerative diseases that are incurable and progressive. Early diagnosis of AD comes with many promises in terms of medicine, sociology, and economics. Despite the existence of numerous studies that aim for early diagnosis of AD, to the best of our knowledge, there is not a publicly available tool that lets end-users assess AD. To address this gap, we propose a Graphical User Interface (GUI) powered by Machine Learning (ML) that makes self-assessment of AD possible – without any input from medical experts. The developed GUI lets end-users enter various information considering both commonly used features for the diagnosis of AD and the questions available in the gold standard screening tool for the diagnosis of AD, namely the Mini-Mental State Exam. In addition to employing 11 traditional ML algorithms, we propose a novel 1-dimensional (1D) Convolutional Neural Network (CNN). All ML models were trained on a gold standard dataset that comprised 373 records from three subject classes as follows: (i) non-demented, (ii) demented, and (iii) converted. Once the end-user enters the required input through the developed GUI, the previously trained ML model assesses the diagnosis of AD through this input in a couple of seconds. According to the experimental results, the proposed novel 1D CNN outperformed the state-of-the-art by obtaining an accuracy as high as 95,3% on the used gold standard dataset.

Keywords: Alzheimer's Disease, classification, cognitive disorder, deep learning, dementia, machine learning.

Öz

Alzheimer Hastalığı (AH), tedavi edilemeyen ve ilerleyici olan en yıkıcı nörodejeneratif hastalıklardan biridir, belki de en yıkıcı olanıdır. AH'nin erken teşhisi, tıp, sosyoloji ve ekonomi açısından birçok avantaj içermektedir. AH'nin erken teşhisine yönelik birçok çalışma olmasına rağmen, bilgimiz dahilinde olan son kullanıcıların AH değerlendirmesini yapmalarına olanak tanıyan açık erişimli bir araç bulunmamaktadır. Bu boşluğu doldurmak için, tıbbi uzmanlardan herhangi bir giriş olmadan AH'nin kendi değerlendirmesini mümkün kılan Makine Öğrenmesi temelli bir grafiksel kullanıcı arayüzü öneriyoruz. Geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü, son kullanıcıları AH teşhisi için yaygın olarak kullanılan öznel özelliklerle birlikte AH teşhisi için altın standart tarama aracı olan Mini-Mental Durum Testi'ndeki soruları da dikkate alarak çeşitli bilgiler girmelerine izin verir. 11 geleneksel makine öğrenmesi algoritmasının kullanımının yanı sıra, benzersiz bir 1-boyutlu Konvolüsyonel Sinir Ağı (KSA) öneriyoruz. Tüm makine öğrenmesi modelleri, (i) bilişsel bozukluğu olmayan, (ii) bilişsel bozukluğu olan ve (iii) dönüştürülen olmak üzere üç konu sınıfından oluşan 373 örneklemler bir altın standart veri setinde eğitilmiştir. Son kullanıcı, geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü aracılığıyla gerekli girişi yaptığında, daha önce eğitilmiş makine öğrenmesi modeli bu girdi üzerinden AH teşhisini birkaç saniye içinde değerlendirmektedir. Deneysel sonuçlara göre, önerilen benzersiz 1-boyutlu KSA, kullanılan altın standart veri setinde %95,3'e kadar yüksek bir doğruluk elde ederek en gelişkin modelleri geride bırakmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alzheimer Hastalığı, bilişsel bozukluk, demans, derin öğrenme, makine öğrenmesi, sınıflandırma.

¹Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Düzce, Türkiye. talhakabakus@duzce.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-2181-4292.

²Düzce University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Düzce, Türkiye. pakizeerdogmus@duzce.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-2172-5767.

1. INTRODUCTION

Alzheimer's Disease (AD) is an irreversible neurodegenerative condition, representing the most commonly diagnosed form of dementia. It is characterized by (i) disturbances in cerebral perfusion, vasculature, and cortical metabolism, (ii) activation of proinflammatory processes, and (iii) the accumulation of amyloid beta and hyperphosphorylated Tau protein (Hnilicova et al., 2023). Patients with AD or dementia (mild to severe) often face challenges in their daily activities and may require support to ensure their lives are safe. As indicated by a recent study, there is a widespread acknowledgment of the substantial impact of Alzheimer's Disease (AD) and dementia, prompting calls for action from opinion leaders and policymakers worldwide. The global estimate of individuals affected by dementia has surpassed 50 million, incurring an annual cost exceeding 1 trillion US dollars (Gustavsson et al., 2023). Projections suggest that the number of people affected by AD and other forms of dementia is expected to reach 152 million by the year 2050 (Nichols et al., 2022). The global trajectory of AD is illustrated in Fig. 1.

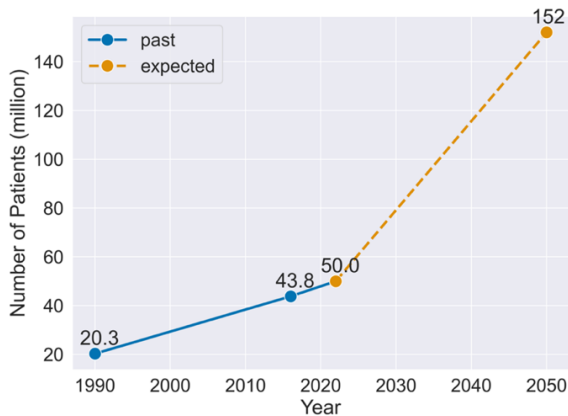


Figure 1. The Plot Depicting The Global Trend of AD (Erdogmus & Kabakus, 2023). By the year 2050, it is anticipated that the projected number of Alzheimer's disease (AD) patients will reach 152 million.

As per a 2019 study proposal, the annual global societal costs of dementia were estimated at approximately \$1.313,4 billion for a population of 55.2 million individuals with dementia, equivalent to \$23,796 per person with dementia. Among these costs, \$213,2 billion was attributed to direct medical expenses, while \$448,7 billion was associated with direct social sector costs, encompassing long-term care (Wimo et al., 2023). Therefore, the early diagnosis of AD is quite important in terms of sociology and economics. The advancement of AD can be more precisely characterized using the 7-stage model proposed by (Reisberg et al., 1982). These stages are categorized from 1 to 7, with corresponding values representing “No impairment”, “Very mild cognitive decline”, “Mild cognitive decline”, “Moderate cognitive decline”, “Moderately severe cognitive decline”, “Severe cognitive decline”, and “Very severe cognitive decline”, respectively. The early identification of Alzheimer's Disease (AD) is of considerable importance, as

emphasized by (Rasmussen & Langerman, 2019). This is particularly crucial during Stages 2 or 3, as per the 7-stage model, where patients remain functionally independent and do not yet display evident signs of dementia. The potential for an early diagnosis extends up to 8 years prior to the manifestation of symptoms linked to dementia (Saxton et al., 2004).

The Mini-Mental State Exam (MMSE) (Folstein et al., 1975) is the gold-standard brief screening tool for the diagnosis of AD that was originally proposed back in 1975. The test consists of a series of questions and tasks that are designed to evaluate various aspects of cognitive functions such as arithmetic, memory, orientation, and language. The total score on the MMSE ranges from 0 to 30, with higher scores signifying better cognitive function. The test is commonly used by healthcare professionals as a quick and initial assessment of cognitive abilities.

Thanks to advances in computer software and hardware and the availability of big datasets, Artificial Intelligence (AI) has made an impact on every part of humans' lives and the field of medicine is no exception. As outlined in the literature, AI finds application in the medical domain through at least four distinct avenues: (i) evaluating the risk of disease onset and predicting treatment efficacy before commencement; (ii) addressing or mitigating complications; (iii) aiding in patient care during active treatment or procedural phases; and (iv) contributing to research endeavors focused on understanding the pathology, mechanisms, and optimal treatments for various diseases (Becker, 2019). As can be observed from Fig. 2, which illustrates the number of studies available on *PubMed* with the search term “artificial intelligence” by year for the last decade, the papers related to AI in the context of biomedical and life sciences literature consistently increase year-over-year.

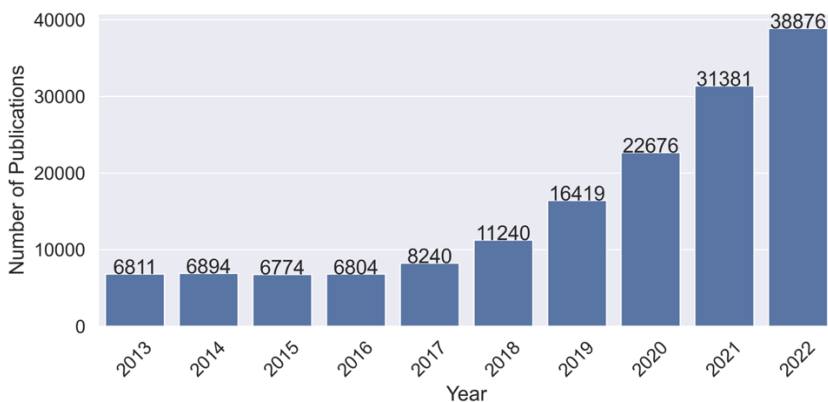


Figure 2. The Plot of the Number of Studies Available on *Pubmed* With The Search Term “Artificial Intelligence” For The Last Decade

In this study, we combine the promises of AI and early diagnosis of AD. To this end, we constructed a wide range of Machine Learning (ML) algorithms that were trained on a gold standard dataset that comprised the critical features for the diagnosis of AD such as MMSE score, age, gender, socioeconomic status based on the *Hollingshead*

Index of Social Position (Hollingshead, 1975), and years of education. The ML algorithms covered by this study include both widely used traditional ML algorithms and a proposed novel 1-dimensional (1D) Convolutional Neural Network (CNN). Finally, we propose a GUI for the end of real-life usage of the proposed model for early diagnosis of AD.

The main contributions of this study can be outlined as follows:

- *Self-diagnosis of AD.* We provide an AI tool with a user-friendly GUI that can be easily used by end-users to assess AD.
- *A wide range of ML models.* A total of 11 ML models were employed for early diagnosis of AD. Additionally, a novel 1D CNN was proposed.
- *High accuracy.* The proposed novel 1D CNN outperformed the state-of-the-art by obtaining an accuracy as high as 95.8% on a gold standard dataset.
- *Broad audience.* The developed GUI was intentionally implemented in the Python programming language to ensure Operating System (OS) independence. Therefore, it can be used seamlessly on any modern OS which would let it be used by a broad audience.
- *A lightweight model.* The proposed system is a lightweight and nimble model capable of classifying a given input in as low as 3 milliseconds on average.
- *Comprehensive hyperparameter optimization.* We systematically conducted a comprehensive hyperparameter optimization task, encompassing a total of 254 trials, in an automated fashion. This process is crucial for determining the optimal value for each hyperparameter in the proposed model, ensuring the derivation of the most effective model that achieves the highest classification accuracy.

The remaining sections of the paper are organized as follows: Section 2 provides an overview of related work. Section 3 outlines the materials and methods employed in the proposed study. Section 4 presents the experimental results and subsequent discussion. Lastly, Section 5 concludes the paper, offering insights into future directions.

2. RELATED WORK

AD is a progressive neurodegenerative disorder that mainly affects memory and cognitive function. As per a recent report (Early-Onset Dementia and Alzheimer's Rates Grow for Younger Americans, 2022), individuals affected by any form of dementia have an average age of 49, with diagnosis rates witnessing a 200% increase from 2013 to 2017. The etiology of AD is still unclear. It is thought that the etiology of AD is a combination of a lot of factors, such as genetic, environmental, and lifestyle factors. Autosomal dominant mutations are effective in both late-onset AD and familial AD (Ringman et al., 2015). The development of both Early-Onset Alzheimer's Disease (EOAD) and Late-Onset Alzheimer's Disease (LOAD) is significantly influenced by genetic factors, particularly mutations in APP, PSEN1, and PSEN2. In addition to genetic factors, non-genetic factors, including occupational exposures (such as exposure to pesticides, organic solvents, electromagnetic fields and volatile anesthetics), pre-existing medical conditions (hypertension, diabetes, cerebrovascular

disease, dyslipidemia, traumatic brain injury, depression, and cancer), and lifestyle factors (such as coffee consumption, smoking, alcohol and physical activity, body mass index and cognitive activity), contribute to the environmental determinants of the conditions (Jiang et al., 2013). Since AD has become more widespread in recent years, early diagnosis of AD is also becoming increasingly important. Many studies in the literature aim for early diagnosis of AD, but these studies were not only proposed by medical researchers but also by computer science researchers. The diagnosis of AD is assessed by multiple evaluations, such as clinical evaluation using a person's medical history, cognitive assessment using some mental evaluation tests such as Mini-Mental State Examination (MMSE) and a Clock Drawing Test (CDT) (Brown et al., 2019; Kato et al., 2013), daily activities, genetic tests, imaging methods such as MRI, CT, PET and SPECT and some medical tests (e.g., blood test). Plasma and cerebrospinal fluid (CSF) p-tau217 demonstrated comparable diagnostic efficacy in identifying Alzheimer's Disease (AD) based on biomarker definitions. A recent study revealed that CSF p-tau biomarkers exhibited larger effect sizes compared to plasma p-tau biomarkers in distinguishing between amyloid-PET positive and negative groups (Therriault et al., 2023). In another recent study, it is suggested that phosphorylated ATM (pATM) and/or phosphorylated APOE (pAPOE) could potentially serve as biomarkers for an early and reliable diagnosis of Alzheimer's disease (AD) using fibroblast samples (Berthel et al., 2023).

Neuroimaging plays a pivotal role in the diagnosis and progression monitoring of AD. In contemporary contexts, the integration of neuroimaging with state-of-the-art AI and Machine Learning (ML) approaches holds significant promise in enhancing diagnostic and prognostic algorithms for identifying neurodegenerative disorders and assessing the effectiveness of treatment regimens (Hnilicova et al., 2023). CNNs are specifically employed in the diagnosis of AD. While, in some studies, 1D diagnostic features are used to train 1D CNNs, in others, imaging datasets are used to train 2D CNNs. If the dataset contains 1D signals and the training data is scarce, 1D CNNs have been proposed and achieved state-of-the-art performance levels (Kiranyaz et al., 2021). 1D features have been converted to 2D images to classify AD using 2D CNNs (Erdogmus & Kabakus, 2023). Some notable large neuroimaging datasets are as follows: *Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI)*, *Australian Imaging, Biomarkers and Lifestyle Aging Flagship Study (AIBL)*, *DZNE-Longitudinal Cognitive Impairment and Dementia Study (DELCODE)*, and *Open Access Series of Imaging Studies (OASIS)*. Many novel CNN models were developed using these datasets for the diagnosis of AD. Most of the time, 3D CNNs are used in related work to make more accurate predictions. However, 3D CNNs require supplementary training data to enhance their performance. When faced with limited data, combining a state-of-the-art deep 2D CNN with a shallow 3D CNN might prove more effective than utilizing a standalone 2D CNN or 3D CNN alone, as suggested by (Xu et al., 2023). According to a recent study, neurological symptoms observed in COVID-19 patients may expedite the onset of AD. In this study, researchers use speech as a non-invasive diagnostic marker. Meaningful temporal speech features, directly extracted from the recordings of the Dementia Bank, have been utilized for the classification of the AD-related Dementia Group and the health control group. Support Vector Machine (SVM) outperformed other ML algorithms with an accuracy of 87% (Karande & Kulkarni, 2023). For automated AD diagnosis in the preliminary stages, imaging methods and DL approaches have been used together. (Sharma et al., 2023) submitted a comprehensive

review focusing on automated early AD diagnosis through Deep Learning (DL) methods, covering the period from 2009 to 2022.

There are also many recent studies using cognitive tests for the diagnosis of AD. In a recent study, a novel architecture incorporating auditory, cognitive, and linguistic aspects was employed to propose a multimodal ensemble system. Scores from the MMSE have been used to assess AD severity (Sahu et al., 2022). In another study, authors proposed a system that concentrates on the MMSE and Functional Activities Questionnaire (FAQ) cognitive tests for the diagnosis of various stages of dementia using both traditional ML algorithms and Neural Network (NN) (Joshi et al., 2009). In another study, the neuropsychological dataset from the ADNI was used to classify MCI (Mild-Cognitive-Impairment) from CN (cognitively normal) using SVM, Random Forest, Gradient Boosting (GB), and AdaBoost (AB) classifiers. The SVM classifier utilizing the Radial Basis Function (RBF) kernel demonstrated the highest performance in MCI detection, achieving an average classification accuracy of 88.06% (Almubark et al., 2020). Another study proposes an analysis of the performance of supervised learning techniques to classify the data patterns of a real dataset of older adults from Pernambuco, Brazil. The study made use of genetic markers (CYP46A1 and APOE), demographic information (gender, age, and level of education, represented by study time), cognitive test scores (MMSE, Clinical Dementia Rating, Ascertaining Dementia, and Semantic Verbal Fluency Test). The objective was to develop a classifier capable of discriminating healthy and pathological aging using ML techniques. The methods applied included Artificial Neural Networks (ANNs), Random Forest, SVM, and Stochastic Gradient Boosting, as detailed in the work by (Lins et al., 2019). In a recent study, a novel multimodal deep regression model was introduced to forecast cognitive test scores by leveraging diverse data types. The multimodal dataset included cerebrospinal fluid (CSF) levels of tau and beta-amyloid, structural measurements from magnetic resonance imaging (MRI), functional and metabolic data from positron emission tomography (PET), and cognitive scores derived from neuropsychological tests (Cog). The primary objective was to attain exceptionally accurate predictions of future MMSE test scores for up to five years following the baseline biomarker collection, as outlined by (Morar et al., 2020). A comparison of the related work is listed in Table 1.

Table 1. A Comparison of The Related Work

| Related Work | Employed Method(s) |
|----------------------------|-----------------------------------|
| (Kiranyaz et al., 2021) | CNN |
| (Erdogmus & Kabakus, 2023) | CNN |
| (Xu et al., 2023) | CNN |
| (Karande & Kulkarni, 2023) | Traditional ML algorithms |
| (Joshi et al., 2009) | Traditional ML algorithms and NN |
| (Almubark et al., 2020) | Traditional ML algorithms |
| (Lins et al., 2019) | Traditional ML algorithms and ANN |

3. MATERIAL AND METHOD

In this section, (i) the used dataset and the employed data preprocessing, (ii) the proposed models, and (iii) the developed GUI are described in the following subsections, respectively.

3.1. Used Dataset and Employed Preprocessing

An ML model's success is greatly bound up with the dataset it was trained on. Therefore, we used a gold standard dataset to train the proposed ML models. The used dataset, namely *OASIS Longitudinal MRI* (Marcus et al., 2010) data, comprised 373 records from 150 subjects, where 64 of them were *demented*, 72 of them were *non-demented*, and the remaining 14 subjects were regarded as *converted*, which means they were not diagnosed with AD at the time of their initial visit; but later were diagnosed with AD. The subjects' ages range from 60 to 98. The distribution of the records available in the used dataset grouped by target class and gender is plotted in Fig. 3.

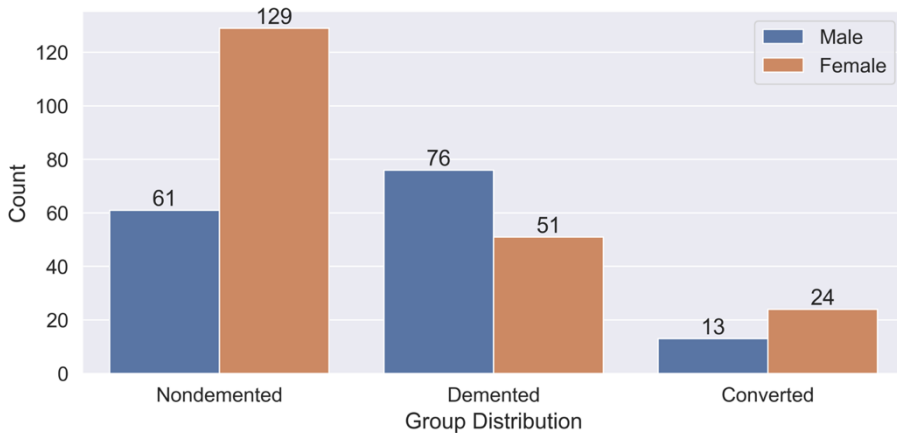


Figure 3. The Plot of the Distribution of the Records Available in the Used Dataset Grouped By Target Class and Gender

As a part of the employed preprocessing, the records with at least 1 NA (Not Available) value, which represents a missing or undefined value, were dropped from the dataset using pandas (The pandas development team, 2020), a widely used, open-source Python library for data manipulation and analysis. Consequently, the preprocessed dataset comprised 354 records, where 150 of them and 204 of them came from male and female subjects, respectively. The original dataset consists of 15 features as listed with their data types and descriptions in Table 2. The features Subject ID and MRI ID were dropped during the preprocessing since they are identically distributed. Also, the feature Hand was dropped since all subjects in the dataset were right-handed. Consequently, the preprocessed dataset consisted of the remaining 12 features. As a part of the preprocessing employed, categorical features were converted into numerical labels. All numerical features were normalized into the range of (0,1) using the

MinMaxScaler utility of scikit-learn (Pedregosa et al., 2011), which is a widely used, open-source ML library for the Python programming language. The data preprocessing employed for the proposed study is illustrated in Fig. 4.

Table 2. The List of the Features of the Used Dataset

| Feature | Data Type | Description |
|-----------------|-----------------------|---|
| <i>Group</i> | Categorical (Nominal) | The class of the record |
| <i>Visit</i> | Numerical (Interval) | The number of visits |
| <i>MR Delay</i> | Numerical (Ratio) | The days between visits |
| <i>M/F</i> | Categorical (Nominal) | Gender |
| <i>Age</i> | Numerical (Interval) | Age |
| <i>EDUC</i> | Numerical (Ratio) | Years of education |
| <i>SES</i> | Categorical (Ordinal) | Socioeconomic status assessed by the <i>Hollingshead Index of Social Position</i> |
| <i>MMSE</i> | Numerical (Ratio) | MMSE score |
| <i>CDR</i> | Numerical (Ratio) | Clinical dementia rating |
| <i>eTIV</i> | Numerical (Interval) | Estimated total intracranial volume |
| <i>nWBV</i> | Numerical (Interval) | Normalized whole-brain volume |
| <i>ASF</i> | Numerical (Interval) | Atlas scaling factor |

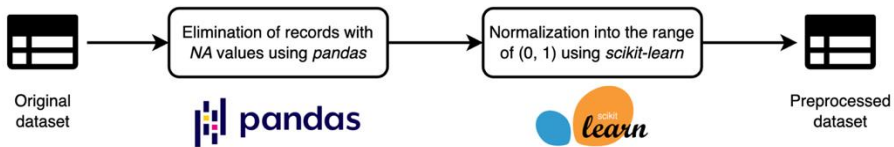


Figure 4. The Illustration of the Employed Data Preprocessing for the Proposed Study

3.2. Proposed Model

A total of 12 models were implemented to cover a wide range of different classifiers for the diagnosis of AD. More specifically, 11 of the covered models were traditional ML algorithms, which are listed in Table 3. The implementations of these algorithms, apart from Learning Vector Quantization, Light Gradient Boosting Machine (GBM), and eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), are available in *scikit-learn* and were employed for the proposed study. For the implementation of the aforementioned three missing ML algorithms, namely (i) Learning Vector Quantization, (ii) Light GBM, and (iii) XGBoost, open-source Python packages, namely (i) *sklvq* (van Veen et al., 2021), (ii) *lightgbm* (Ke et al., 2017; *Light Gradient Boosting Machine*, 2024), and (iii) *xgboost* (Chen & Guestrin, 2016; *XGBoost Documentation*, 2024), were employed, respectively.

Table 3. The List of The Employed Traditional ML Algorithms With Their Hyperparameters

| Traditional ML Algorithm | Employed Hyperparameters |
|-------------------------------------|---|
| Support Vector Machine (SVM) | - Kernel type: Linear |
| Logistic Regression | - Penalty: L2 - Tolerance for stopping criteria: $1xe^{-4}$ - Inverse of regularization strength: 1,0 |
| Stochastic Gradient Descent (SGD) | - Loss function: Linear SVM - Penalty: L2 - Regularization multiplication constant: 0,0001 |
| Naïve Bayes | - Smoothing: $1xe^{-9}$ |
| Random Forest | - Number of trees: 100 - Quality measurement function: Gini |
| Decision Tree | - Quality measurement function: Gini |
| k-Nearest Neighbors (kNN) | - Number of neighbors (k): 3 |
| Linear Discriminant Analysis (LDA) | - Solver: Singular value decomposition - Threshold: $1xe^{-4}$ |
| Learning Vector Quantization | - Distance function: Squared Euclidean - Activation function: Sigmoid - Discriminant function: Relative Distance - Solver: Steepest Gradient Descent |
| Light GBM | - Boosting type: Gradient Boosting Decision Tree - Learning rate: 0,1 - Number of trees: 100 |
| eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) | - Number of trees: 100 - Objective: Binary Logistic |

In addition to the employed 10 traditional ML algorithms, a novel 1D CNN, which comprised 5 layers, was proposed to benefit from the power of CNNs. *TensorFlow* (Abadi et al., 2016), a widely used ML suite from *Google*, was employed as the DL backend. *Keras* (Chollet, 2017), a high-level Application Programming Interface (API) for *TensorFlow*, was employed for the implementation of the proposed CNN. The proposed CNN starts with a 1D Convolutional layer (*Conv1D*) with 16 filters and a kernel size of 3 which refers to the dimension of the filter. *Conv1D* layers are responsible for the convolution operation on the input through its filters. Another *Conv1D* layer with 32 filters and a kernel size of 5 followed the first *Conv1D* layer. A third *Conv1D* layer with 32 filters and a kernel size of 7 followed the second *Conv1D* layer. Then, a *Flatten* layer, which is responsible for reshaping the given input into a vector, followed. A *Dense* layer, which is a deeply connected layer whose neurons are connected to every neuron in the preceding layer, was employed as the final layer of the proposed CNN. This *Dense* layer was responsible for the classification of the given input into one of the three target classes, namely (i) *demented*, (ii) *non-demented*, and

(iii) converted. To this end, this *Dense* layer was configured (i) to have as many units as the number of target classes (3) and (ii) *Softmax* was employed as the activation function which converts a vector of real numbers into a probability distribution and the class with the highest probability is predicted as the output of the network. The loss function of a Deep Neural Network (DNN) is responsible for estimating the loss of the model. *Categorical Cross – Entropy* was employed as the loss function of the proposed CNN. Fig. 5 illustrates an overview of the architecture of the proposed novel CNN.

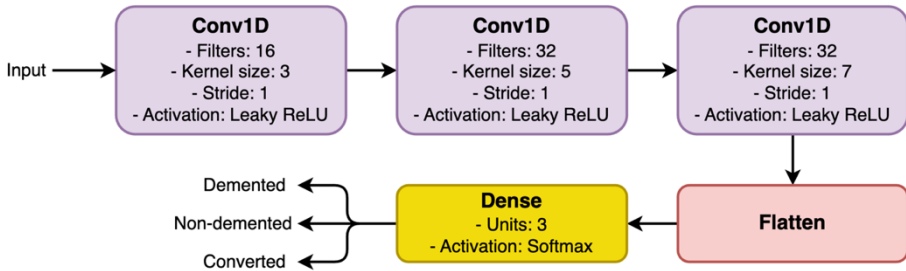


Figure 5. The Illustration of A High-Level View of the Architecture of the Proposed Novel CNN

Hyperparameters of a DNN are the parameters that are set empirically and affect the learning process (Chollet, 2017; Zhang et al., 2019). The official tuner of *Keras*, *Keras Tuner* (O'Malley et al., 2019), was employed for the hyperparameter optimization of the proposed CNN. The optimization algorithm chosen for the hyperparameter optimization task was *Hyperband* (Li et al., 2018), a widely utilized method that combines random search with aggressive early stopping to efficiently explore the hyperparameter space. *Hyperband* offers several advantages, including efficiency, scalability, flexibility, and the ability to provide state-of-the-art performance. The objective of the optimization task was to minimize the loss obtained for the validation set. An activation function is a mathematical operation that introduces non-linearity into the model. The optimization algorithm of a DNN is responsible for adjusting the parameters of a model to minimize the error or loss of the model calculated by the employed loss function. The learning rate determines the size of the steps made to the model's weights during the training. As listed in Table 4, the hyperparameters (i) activation function, (ii) optimization algorithm, (iii) learning rate, and (iv) batch size, which is the number of training examples utilized in one iteration, were optimized through the employed hyperparameter optimization task. The obtained optimum value for each hyperparameter is given in bold in Table 4. As can be seen in this table, *Leaky Rectified Linear Unit (ReLU)*, *Adamax* (Kingma & Ba, 2015), $1e^{-2}$, and 8 were employed as the activation function, optimization algorithm, learning rate, and batch size of the proposed CNN, respectively. *Leaky ReLU* is a variant of *ReLU* that has a small slope for negative values instead of a flat slope. *Adamax* is a variant of *Adam* based on the infinity norm (Kingma & Ba, 2015).

Table 4. The list of hyperparameters optimized through the employed hyperparameter optimization task. The obtained optimum value for each hyperparameter is given in bold.

| Hyperparameter | Evaluated Values |
|------------------------|--|
| Activation function | <i>ReLU, eLU, Leaky ReLU, PReLU</i> |
| Optimization algorithm | <i>Adam, Adamax, Adadelata, SGD, RMSprop</i> |
| Learning rate | 1×10^{-2} , 1×10^{-3} , 1×10^{-4} |
| Batch size | 8 , 16, 32, 64 |

3.3. Developed GUI

For the self-assessment of the AD, we developed a GUI using the Python programming language, which was intentionally chosen since it is platform-independent. Therefore, the developed GUI can be run in any environment that supports the execution of Python. More specifically, *CustomTkinter* (Schimansky, 2024), a modern and customizable Python UI library based on the standard Python module *tkinter*, was employed for the GUI implementation. The developed GUI assesses AD through the features of the used dataset. The features that require medical experts' input were eliminated since we aim to provide a GUI capable of self-assessment of AD in a couple of minutes. These features are (i) age, (ii) gender, (iii) years of education (EDUC), (iv) socioeconomic status (SES), and (v) the score of the MMSE, which requires the exact questions of MMSE that investigates the cognitive impairment of the subject. Therefore, the answers to the questions in MMSE were taken through the keyboard and microphone. To vocalize the sentences of MMSE, we employed a Python library, namely *gTTS* (Durette, 2023), that interfaces with the *Google Text-to-Speech API*. The employed text-to-speech mechanism is illustrated in Fig. 6.

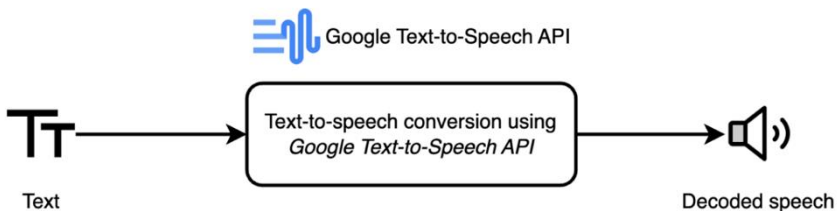


Figure 6. The Illustration of the Employed Text-to-Speech Mechanism

To evaluate the accuracy of the voice input taken from the microphone, it is necessary to convert it to text. To this end, we employed OpenAI's Whisper (Radford et al., 2023), a versatile speech recognition model trained on a comprehensive dataset of diverse audio inputs. Whisper computes the log-mel spectrogram of the given sound to make the input ready to be yielded into the proposed 1D CNN. The output of the model is the decoded text in the declared natural language, which was English in our case. It is worth mentioning that Whisper requires the command-line tool FFmpeg (Bellard, 2023) to be installed on the operating system. The employed speech-to-text mechanism is illustrated in Fig. 7.

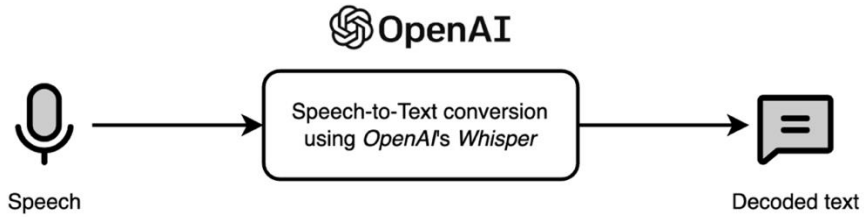


Figure 7. The Illustration of the Employed Text-to-Speech Mechanism

As can be observed from Fig. 8, which presents the developed GUI for early diagnosis of AD, the developed GUI takes answers from end-users to the provided 21 questions. While 4 of them, namely (i) “*Select your gender*”, (ii) “*Enter your age*”, (iii) “*Enter your years of education*”, and (iv) “*Enter your socioeconomic status*” were taken from the used dataset, the remaining 17 questions were taken from the gold standard MMSE. The ground truths to the questions “*Enter the current year*”, “*Enter the current season*”, “*Enter the current month*”, “*Enter the current day of month*”, “*Enter the name of the current day of month*”, “*Enter the country you live in*”, and “*Enter the city you’re in*” were obtained programmatically. More specifically, the date and time were obtained from the system. The location information was obtained from the *IPInfo* website (*IPInfo*, 2023). It is worth mentioning that *IPInfo* provides the ISO-standard country code of the current location instead of the country name. The retrieved country code was mapped to the corresponding country name using a widely used, open-source Python library, namely *pycountry* (Theune, 2023). The ground truths to the questions “*Enter the state you’re in*”, “*Enter the name of the apartment you’re in*”, and “*Enter the floor you’re on*” were retrieved from a JSON file located in the same folder of the developed GUI’s source code with the keys “*state*”, “*apartment*”, and “*floor*”, respectively. Once the end-user clicks the “*Evaluate Mini-Mental State Test*” button after entering the required inputs for the assessment of AD, a dialog window, such as the one presented in Fig. 9, is displayed to inform the end-user regarding the diagnosis result. This sample result was obtained when the input was evaluated with the best-performing model, the proposed 1D CNN.

Figure 8. The Main UI of the Developed Tool for Early Diagnosis of AD

Your point card:

- Got 1 point for year [2023]
- Got 1 point for month [november]
- Got 1 point for day [20]
- Got 1 point for day name [monday]
- Got 1 point for season [autumn]
- Got 1 point for country [türkiye]
- Got 1 point for city [düzce]
- Got 1 point for state [merkez]
- Got 1 point for apartment [m2]
- Got 1 point for floor [3]
- Got 1 point for saying "table"
- Got 1 point for saying "flag"
- Got 1 point for saying "dress"
- Got 1 point for correctly counting backwards
- Got 1 point for remembering "table"
- Got 1 point for remembering "flag"
- Got 1 point for remembering "dress"
- Got 1 point for recognizing "clock"
- Got 1 point for recognizing "pencil"
- Got 1 point for writing a grammatically correct sentence [I'm happy]

Your Mini-Mental State Test score is 24 and our prediction regarding your mental state is Nondemented.
The duration of the analysis took 4.76 seconds.

OK

Figure 9. The UI of the Developed Tool That Displays the Diagnosis Result of AD

4. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The metrics used to evaluate the classification performance of the proposed ML models are described in the following subsection. Then, in the next subsections, we present the experimental results and discussion for the proposed two approaches: (i) the ML models based on the feature subset of the GUI, and (ii) the ML models based on all the features available in the used gold standard dataset, respectively.

4.1. Evaluation Metrics

The *de facto* standard metrics that are used to evaluate the performance of classifiers, namely (i) *Accuracy*, (ii) *Precision*, (iii) *Recall*, and (iv) *F1 – score* were employed for the evaluation of the proposed ML models. Let P denote positives, representing samples labeled with the target class, and N represent negatives, indicating samples labeled with the complementary class of the target. TP , TN , FP , and FN denote correctly predicted *positives*, correctly predicted *negatives*, *positives* incorrectly predicted as *negative*, and *negatives* incorrectly predicted as *positive*, respectively. *Accuracy* is the ratio of correctly predicted samples to the total number of samples. The equation of *accuracy* is given in Eq. 1. *Precision* is defined as the ratio of accurately predicted positive instances to the total number of instances predicted as positive. The equation of *precision* is given in Eq. 2. *Recall* is the ratio of correctly predicted positive instances to the total number of actual positive instances. The equation of *recall* is given in Eq. 3. *F1 – score* is the harmonic mean of the *Precision* and *Recall* and is more useful than *Accuracy* when dealing with imbalanced datasets. The equation of *F1 – score* is given in Eq. 4.

$$Accuracy = (TP + TN) / (P + N) \quad (1)$$

$$Precision = TP / (TP + FP) \quad (2)$$

$$Recall = TP / (TP + FN) \quad (3)$$

$$F1 - score = 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall) \quad (4)$$

When it comes to visualization of the evaluation results, we employed a confusion matrix, which is a specific table that provides a comprehensive summary of the model's predictions compared to the actual outcomes. The confusion matrix serves as a valuable tool for understanding the strengths and weaknesses inherent in a classification model.

4.2. Experimental Results and Discussion of ML Models Based on the Developed GUI

70% of the constructed dataset was allocated as the training set, while the remaining 30% was designated as the test set. Consequently, the training set comprised 283 samples, while the test set comprised 71 samples. *Scikit-learn* was employed for the dataset splitting with shuffling. All the employed ML models were trained and tested on the same designated subsets. More specifically, the proposed novel 1D CNN was trained for 50 epochs and 30% of the training set was used as the validation set, which

is a distinct subset of the data that the model has not seen during training. The accuracy values for both the training and validation sets during the model's training are depicted in Fig. 10, which confirms neither overfitting nor underfitting was the case for the model.

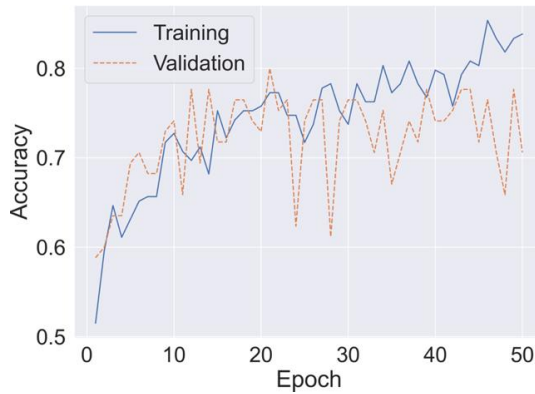


Figure 10. The Graph Illustrating The Accuracy Values Acquired for Both The Training and Validation Sets Throughout The Training Process of the Proposed Novel 1D CNN Based on the Developed GUI

As can be observed from Fig. 11, which presents the obtained accuracy values when the employed ML models were evaluated on the test set, both Random Forest and kNN achieved the best accuracy, an accuracy of as high as 87,32%, among all the employed ML models. The employed kNN achieved a higher F1-score (84.97%) compared to the employed Random Forest (81,71%). Therefore, the employed kNN was regarded as the best model for the early diagnosis of AD. As the confusion matrix of the evaluation result of the employed kNN is presented in Fig. 12, 62 of 71 test samples were correctly classified. The employed kNN was persisted into a file, allowing it to be utilized within the developed GUI.

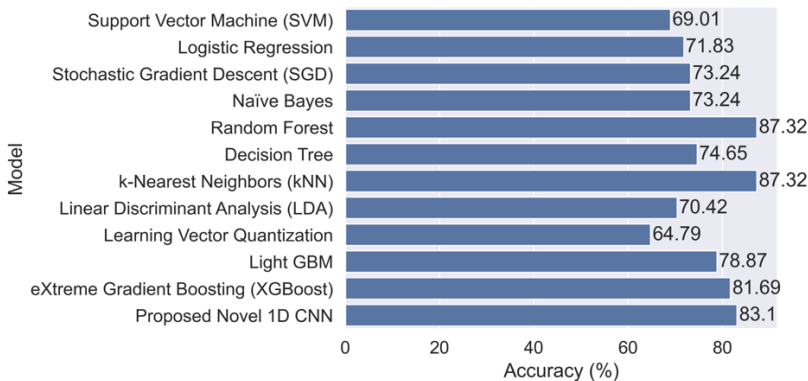


Figure 11. The Evaluation Results of the Employed ML Models Using The Dataset That Covers The Feature Subset of the Developed GUI

| | | | | |
|--------------|-------------|-----------------|----------|-------------|
| Actual Class | Converted | 6 | 0 | 1 |
| | Demented | 2 | 21 | 5 |
| | Nondemented | 0 | 1 | 35 |
| | | Converted | Demented | Nondemented |
| | | Predicted Class | | |

Figure 12. The Confusion Matrix of the Employed kNN, Which Achieved The Best Classification Performance Among All The Employed ML Models

4.3. Experimental Results and Discussion of ML Models Based on Used Gold Standard Dataset

Our study aimed to assess the performance of the proposed ML models in comparison to the state-of-the-art. To provide a quantitative comparison of the proposed ML models with the state-of-the-art, we also conducted experiments using all the features available in the used gold standard dataset. The preprocessing employed in the previous approach was also used for this experiment. Therefore, the training set comprised 283 samples and the test set comprised the remaining 71 samples. Unlike the previous approach, this time each sample of the dataset comprised 11 features instead of 5. All the employed ML models were trained and tested on the same designated subsets. More specifically, the training of the proposed novel 1D CNN utilized the Early Stopping callback. This component actively monitored the model's performance on a validation set throughout the training process and halted the training when signs of performance degradation were detected. The Early Stopping callback was employed with the following two hyperparameters: (i) the loss calculated for the validation set was monitored, and (ii) the *patience*, which is the number of consecutive epochs with no improvement on the monitored criterion before the training process is halted, was set 20. The training of the proposed novel 1D CNN was extended for a total of 58 epochs, concluding when the Early Stopping callback intervened and terminated the training process. Consistent with the prior approach, 30% of the training set served as the validation set. The accuracy values for both the training and validation sets were plotted during the model's training, as depicted in Fig. 13. The results indicate that neither overfitting nor underfitting occurred in the model.

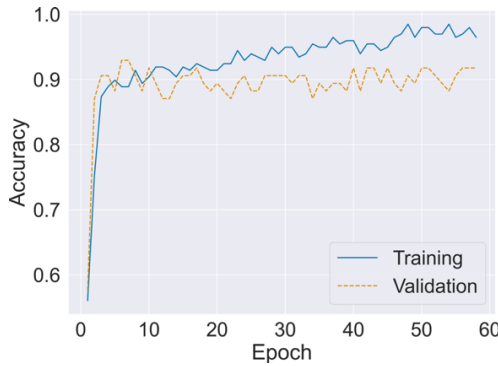


Figure 13. The Plot Depicting The Accuracy Values Attained for Both The Training and Validation Sets During The Training Phase of the Proposed Novel 1D CNN Based on Used Gold Standard Dataset

As evident from Fig. 14, depicting the accuracy values obtained when evaluating the employed ML models on the test set, the proposed novel 1D CNN outperformed all other models with an accuracy as high as 95,8%. For a more comprehensive classification comparison, the comparison of the employed ML models in terms of all evaluation metrics is listed in Table 5.

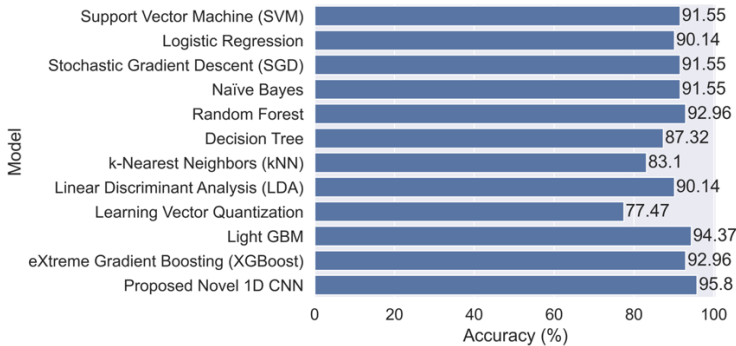


Figure 14. The Evaluation Results of the Employed ML Models Using The Dataset That Covers All Features

Table 5. The evaluation results of the employed ML models based on all metrics utilized, utilizing the dataset containing all features.

| Model | Accuracy (%) | Precision (%) | Recall (%) | F1-Score (%) |
|-------------------------------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Support Vector Machine (SVM) | 91,55 | 94,44 | 71,43 | 72,1 |
| Logistic Regression | 90,14 | 93,64 | 70,24 | 71,08 |
| Stochastic Gradient Descent (SGD) | 91,55 | 94,44 | 71,43 | 72,1 |
| Naïve Bayes | 91,55 | 84,37 | 75 | 77,06 |
| Random Forest | 92,96 | 95,21 | 76,19 | 79 |
| Decision Tree | 87,32 | 75,79 | 75,79 | 75,79 |
| k-Nearest Neighbors (kNN) | 83,1 | 70,11 | 68,39 | 69,01 |
| Linear Discriminant Analysis (LDA) | 90,14 | 93,64 | 70,24 | 71,08 |
| Learning Vector Quantization | 77,47 | 56,41 | 55,96 | 54,22 |
| Light GBM | 94,37 | 96,02 | 80,95 | 84,62 |
| eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) | 92,96 | 87,64 | 80,03 | 82,33 |
| Proposed novel 1D CNN | 95,8 | 95,62 | 95,59 | 95,78 |

As listed in Table 6, this experimental result indicates that the proposed novel 1D CNN outperformed the state-of-the-art that used the same dataset. As the confusion matrix of the evaluation result of the proposed novel 1D CNN is presented in Fig. 15, 68 of 71 test samples were correctly classified. In other words, only 3 (1 demented and 2 converted) test samples were incorrectly classified. The recall of the target class “demented” was calculated as high as 100%, which indicates that all demented subjects were correctly identified.

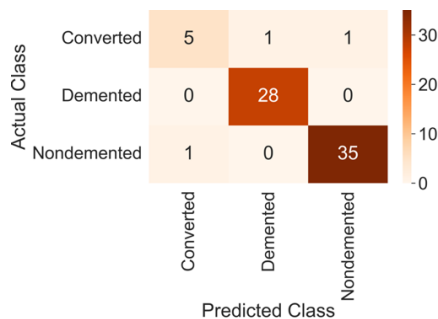


Figure 15. The Confusion Matrix of the Proposed Novel 1D CNN, Which Achieved The Best Classification Performance Among All The Employed ML Models

Table 6. A Quantitative Comparison of the Proposed 1D CNN With Studies in the Literature That Used The Same Dataset

| Related Work | Employed Method | Accuracy (%) |
|--|---------------------------|--------------|
| <i>Amrutesh et al.</i> (Amrutesh et al., 2022) | Traditional ML algorithms | 92,13 |
| <i>Almubark et al.</i> (Almubark et al., 2020) | Traditional ML algorithms | 88,06 |
| <i>Chowdary et al.</i> (Chowdary et al., 2021) | Traditional ML algorithms | 89,4 |
| <i>Abdelminaam et al.</i> (Abdelminaam et al., 2023) | Traditional ML algorithms | 86,9 |
| <i>Vidushi et al.</i> (Vidushi et al., 2020) | Traditional ML algorithms | 84,21 |
| <i>Kavitha et al.</i> (Kavitha et al., 2022) | Traditional ML algorithms | 86,92 |
| <i>Jadhao et al.</i> (Jadhao et al., 2023) | Traditional ML algorithms | 85,71 |
| <i>Ozhan et al.</i> (Ozhan et al., 2022) | Artificial Neural Network | 94,7 |
| <i>Shetty et al.</i> (Shetty et al., 2022) | Traditional ML algorithms | 91,99 |
| <i>Arjaria et al.</i> (Arjaria et al., 2022) | Traditional ML algorithms | 90 |
| This study | 1D CNN | 95,8 |

4.4. Known Limitations

The developed GUI misses the features that require input from medical experts. Also, we eliminated some questions of MMSE that require analysis of the performed actions. Even though the developed GUI can record these actions through a webcam, as of now, we are not able to programmatically interpret a given video recording. This limitation is regarded as a future work of this study.

6. CONCLUSION

AI plays a crucial role in healthcare, contributing to a diverse range of key applications. These include, but are not limited to, medical imaging and diagnostics, predictive analysis for patient outcomes, virtual healthcare assistants, robot-assisted surgery, and mental health monitoring. Similarly, AI is instrumental in facilitating early disease diagnosis. In this study, we introduce a GUI integrated with machine learning capabilities, enabling end-users to seamlessly assess the early diagnosis of AD, which is one of the most, if not the most, devastating neurodegenerative diseases. To achieve

this, we initially trained a variety of ML models using a gold standard dataset specifically designed for early AD diagnosis, consisting of 373 records from 150 subjects. Addressing the lack of publicly available GUIs for early AD diagnosis, we present a user-friendly interface powered by the proposed ML model. The proposed models were evaluated on this gold standard dataset to reveal their efficiencies in terms of classifying a given subject into one of the three target subject classes: (i) *non-demented*, (ii) *demented*, and (iii) *converted*. According to the experimental results, the proposed novel 1D CNN outperformed the state-of-the-art by obtaining an accuracy as high as 95,8%.

In future endeavors, our aim is to incorporate features that were initially excluded from consideration due to their reliance on input from medical experts. This entails finding a method to interpret video recordings effectively. This enhancement would enable us to (i) introduce an AI tool for the early diagnosis of AD that encompasses all the standard questions of the MMSE and (ii) potentially enhance the classification accuracy of the proposed model by leveraging the enriched feature set. Additionally, we intend to explore the utilization of other types of DNNs (e.g., RNNs) to further improve the obtained classification accuracy. Finally, we would like to employ data augmentation techniques to achieve a balanced dataset.

Authors Contribution

Abdullah Talha Kabakus contributed for Methodology, Software, Investigation, Writing – original draft, Reviewing, Editing. *Pakize Erdogmus* contributed for Methodology, Conceptualization, Investigation, Writing – original draft, Reviewing, Editing.

Competing Interest

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

Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G., Isard, M., Kudlur, M., Levenberg, J., Monga, R., Moore, S., Murray, D. G., Steiner, B., Tucker, P., Vasudevan, V., Warden, P., ... Zheng, X. (2016). TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning. *Proceedings of the 12th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 2016)*, 265–283.

- Abdelminaam, D. S., Madbouly, M. M., Farag, M. S., Gomaa, I. A., Abd-Elghany Zeid, M., & Abualigah, L. (2023). ML_Alzheimer: Alzheimer Disease Prediction Using Machine Learning. *Proceedings of the 3rd International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC 2023)*, 409–414. <https://doi.org/10.1109/MIUCC58832.2023.10278361>
- Almubark, I., Alsegehy, S., Jiang, X., & Chang, L. C. (2020). Early Detection of Mild Cognitive Impairment using Neuropsychological Data and Machine Learning Techniques. *Proceedings of the 2020 IEEE Conference on Big Data and Analytics (ICBDA 2020)*, 32–37. <https://doi.org/10.1109/ICBDA50157.2020.9289741>
- Amrutesh, A., Gowtham Bhat, C. G., Amruthamsh, A., Asha Rani, K. P., & Gowrishankar, S. (2022). Alzheimer's Disease Prediction using Machine Learning and Transfer Learning Models. *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Computational System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS 2022)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CSITSS57437.2022.10026365>
- Arjaria, S. K., Rathore, A. S., Bisen, D., & Bhattacharyya, S. (2022). Performances of Machine Learning Models for Diagnosis of Alzheimer's Disease. *Annals of Data Science*, 1–29. <https://doi.org/10.1007/s40745-022-00452-2>
- Becker, A. (2019). Artificial intelligence in medicine: What is it doing for us today? *Health Policy and Technology*, 8(2), 198–205. <https://doi.org/10.1016/J.HLPT.2019.03.004>
- Bellard, F. (2023). *FFmpeg*. Retrieved January 1, 2024 from <https://ffmpeg.org>
- Berthel, E., Pujó-Menjouet, L., Le Reun, E., Sonzogni, L., Al-Choboq, J., Chekroun, A., Granzotto, A., Devic, C., Ferlazzo, M. L., Pereira, S., Bourguignon, M., & Foray, N. (2023). Toward an Early Diagnosis for Alzheimer's Disease Based on the Perinuclear Localization of the ATM Protein. *Cells*, 12(1747), 1–21. <https://doi.org/10.3390/cells12131747>
- Brown, J., Wiggins, J., Lansdall, C. J., Dawson, K., Rittman, T., & Rowe, J. B. (2019). Test Your Memory (TYM test): diagnostic evaluation of patients with non-Alzheimer dementias. *Journal of Neurology*, 266(10), 2546–2553. <https://doi.org/10.1007/s00415-019-09447-1>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. *Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD '16), 13-17-August-2016*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Chollet, F. (2017). *Deep Learning with Python*. Manning Publications.

- Chowdary, B. V., Muppidi, S., Sruthi, B., Madhuri, K. S., & Sumanth, L. (2021). An Effective and Efficient Alzheimer Disease Prediction System Using Machine Learning Model. *Proceedings of the 5th International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC 2021)*, 342–347. <https://doi.org/10.1109/I-SMAC52330.2021.9641022>
- Durette, P. N. (2023). *gTTS*. Retrieved January 1, 2024 <https://gtts.readthedocs.io/en/latest/>
- Early-Onset Dementia and Alzheimer's Rates Grow for Younger Americans*. (2022). <https://doi.org/10.9>
- Erdogmus, P., & Kabakus, A. T. (2023). The promise of convolutional neural networks for the early diagnosis of the Alzheimer's disease. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106254>
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). "Mini-mental state": A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12(3), 189–198. [https://doi.org/10.1016/0022-3956\(75\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6)
- Gustavsson, A., Norton, N., Fast, T., Frölich, L., Georges, J., Holzapfel, D., Kirabali, T., Krolak-Salmon, P., Rossini, P. M., Ferretti, M. T., Lanman, L., Chadha, A. S., & van der Flier, W. M. (2023). Global estimates on the number of persons across the Alzheimer's disease continuum. *Alzheimer's and Dementia*, 19(2). <https://doi.org/10.1002/alz.12694>
- Hnilicova, P., Kantorova, E., Sutovsky, S., Grofik, M., Zelenak, K., Kurca, E., Zilka, N., Parvanovova, P., & Kolisek, M. (2023). Imaging Methods Applicable in the Diagnostics of Alzheimer's Disease, Considering the Involvement of Insulin Resistance. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 24, Issue 3325, pp. 1–31). <https://doi.org/10.3390/ijms24043325>
- Hollingshead, A. (1975). Four factor index of social status. In *Yale Journal of Sociology* (Vol. 8).
- IPinfo*. (2023). Retrieved January 1, 2024 <https://ipinfo.io>
- Jadhao, P., Palsodkar, P., Raut, R., Chaube, K., Rathod, D., & Palsodkar, P. (2023). Prediction of Early Stage Alzheimer's using Machine Learning Algorithm. *2023 4th International Conference for Emerging Technology, INCET 2023*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/INCET57972.2023.10170583>
- Jiang, T., Yu, J.-T., Tian, Y., & Tan, L. (2013). Epidemiology and Etiology of Alzheimer's disease: From Genetic to Non-Genetic Factors. *Current Alzheimer Research*, 10(8), 852–867. <https://doi.org/10.2174/15672050113109990155>

- Joshi, S., Shenoy, P. D., Venugopal, K. R., & Patnaik, L. M. (2009). Evaluation of Different Stages of Dementia Employing Neuropsychological and Machine Learning Techniques. *Proceedings of the 2009 1st International Conference on Advanced Computing (ICAC 2009)*, 154–160. <https://doi.org/10.1109/ICADVC.2009.5378199>
- Karande, S., & Kulkarni, V. (2023). Automated Prognosis of Alzheimer's Disease using Machine Learning Classifiers on Spontaneous Speech Features. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(2), 245–251.
- Kato, Y., Narumoto, J., Matsuoka, T., Okamura, A., Koumi, H., Kishikawa, Y., Terashima, S., & Fukui, K. (2013). Diagnostic performance of a combination of Mini-Mental State Examination and Clock Drawing Test in detecting Alzheimer's disease. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 9, 581–586. <https://doi.org/10.2147/NDT.S42209>
- Kavitha, C., Mani, V., Srividhya, S. R., Khalaf, O. I., & Tavera Romero, C. A. (2022). Early-Stage Alzheimer's Disease Prediction Using Machine Learning Models. *Frontiers in Public Health*, 10, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.853294>
- Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T. Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30(NIPS 2017), 3149–3157.
- Kingma, D. P., & Ba, J. L. (2015). Adam: A Method for Stochastic Optimization. *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015)*, 1–15.
- Kiranyaz, S., Avci, O., Abdeljaber, O., Ince, T., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). 1D convolutional neural networks and applications: A survey. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107398>
- Li, L., Jamieson, K., DeSalvo, G., Rostamizadeh, A., & Talwalkar, A. (2018). Hyperband: A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization. *Journal of Machine Learning Research*, 18(1), 6765–6816.
- Light Gradient Boosting Machine. (2024). Microsoft. Retrieved January 1, 2024 <https://lightgbm.readthedocs.io>
- Lins, A. J. C. C., Muniz, M. T. C., & Bastos-Filho, C. J. A. (2019). Comparing Machine Learning Techniques for Dementia Diagnosis. *Proceedings of the 2018 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI 2018)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/LA-CCI.2018.8625209>

- Marcus, D. S., Fotenos, A. F., Csernansky, J. G., Morris, J. C., & Buckner, R. L. (2010). Open Access Series of Imaging Studies: Longitudinal MRI Data in Nondemented and Demented Older Adults. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(12), 2677–2684. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21407>
- Morar, U., Martin, H., Izquierdo, W., Forouzaneshad, P., Zarafshan, E., Curiel, R. E., Roselli, M., Loewenstein, D., Duara, R., Unger, E., & Adjouadi, M. (2020). A Deep-Learning Approach for the Prediction of Mini-Mental State Examination Scores in a Multimodal Longitudinal Study. *Proceedings of the 2020 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI 2020)*, 761–766. <https://doi.org/10.1109/CSCI51800.2020.00144>
- Nichols, E., Steinmetz, J. D., Vollset, S. E., Fukutaki, K., Chalek, J., Abd-Allah, F., Abdoli, A., Abualhasan, A., Abu-Gharbieh, E., Akram, T. T., Al Hamad, H., Alahdab, F., Alanezi, F. M., Alipour, V., Almustanyir, S., Amu, H., Ansari, I., Arabloo, J., Ashraf, T., ... Vos, T. (2022). Estimation of the global prevalence of dementia in 2019 and forecasted prevalence in 2050: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Public Health*, 7, 105–125. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(21\)00249-8](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(21)00249-8)
- O'Malley, T., Bursztein, E., Long, J., & Chollet, F. (2019). *KerasTuner*. Keras. Retrieved January 1, 2024 <https://github.com/keras-team/keras-tuner>
- Ozhan, O., Kucukakcali, Z., & Balıkcı Cicek, I. (2022). Risk Prediction Model for Dementia by Deep Learning Using Clinical Data. *The Journal of Cognitive Systems*, 7(2), 1–4. <https://doi.org/10.52876/jcs>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825–2830.
- Radford, A., Kim, J. W., Xu, T., Brockman, G., McLeavey, C., & Sutskever, I. (2023). Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision. *ArXiv*, 2212.04356, 1–28. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.04356>
- Rasmussen, J., & Langerman, H. (2019). Alzheimer's Disease – Why We Need Early Diagnosis. *Degenerative Neurological and Neuromuscular Disease*, 9, 123–130. <https://doi.org/10.2147/dnnd.s228939>
- Reisberg, B., Ferris, S. H., De Leon, M. J., & Crook, T. (1982). The global deterioration scale for assessment of primary degenerative dementia. *American Journal of Psychiatry*, 139, 1136–1139. <https://doi.org/10.1176/ajp.139.9.1136>

- Ringman, J. M., Liang, L. J., Zhou, Y., Vangala, S., Teng, E., Kremen, S., Wharton, D., Goate, A., Marcus, D. S., Farlow, M., Ghetti, B., McDade, E., Masters, C. L., Mayeux, R. P., Rossor, M., Salloway, S., Schofield, P. R., Cummings, J. L., Buckles, V., ... Morris, J. C. (2015). Early behavioural changes in familial Alzheimer's disease in the Dominantly Inherited Alzheimer Network. *Brain*, *138*(4), 1036–1045. <https://doi.org/10.1093/brain/awv004>
- Sahu, H. K., Kumar, S., Alsamhi, S. H., Chaube, M. K., & Curry, E. (2022). Novel Framework for Alzheimer Early Diagnosis using Inductive Transfer Learning Techniques. *Proceedings of the 2022 2nd International Conference on Emerging Smart Technologies and Applications (ESmarTA 2022)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/eSmarTA56775.2022.9935379>
- Saxton, J., Lopez, O. L., Ratcliff, G., Dulberg, C., Fried, L. P., Carlson, M. C., Newman, A. B., & Kuller, L. (2004). Preclinical Alzheimer disease: Neuropsychological test performance 1.5 to 8 years prior to onset. *Neurology*, *63*(12), 2341–2347. <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000147470.58328.50>
- Schimansky, T. (2024). *CustomTkinter*. Retrieved January 1, 2024 <https://customtkinter.tomschimansky.com>
- Sharma, R., Goel, T., Tanveer, M., Lin, C. T., & Murugan, R. (2023). Deep-Learning-Based Diagnosis and Prognosis of Alzheimer's Disease: A Comprehensive Review. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, *15*(3), 1123–1138. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2023.3254209>
- Shetty, M., Deekshitha, Bhat, M., & Devadiga, M. (2022). Detection of Alzheimer's Disease Using Machine Learning. *International Conference on Artificial Intelligence and Data Engineering, AIDE 2022*, 117–120. <https://doi.org/10.1109/AIDE57180.2022.10060433>
- The pandas development team. (2020). *pandas: Python Data Analysis Library*. Retrieved January 1, 2024 <https://pandas.pydata.org>
- Therriault, J., Servaes, S., Tissot, C., Rahmouni, N., Ashton, N. J., Benedet, A. L., Karikari, T. K., Macedo, A. C., Lussier, F. Z., Stevenson, J., Wang, Y. T., Fernandez-Arias, J., Stevenson, A., Socualaya, K. Q., Haeger, A., Nazneen, T., Aumont, É., Hosseini, A., Rej, S., ... Rosa-Neto, P. (2023). Equivalence of plasma p-tau₂₁₇ with cerebrospinal fluid in the diagnosis of Alzheimer's disease. *Alzheimer's and Dementia*, *19*(11), 4967–4977. <https://doi.org/10.1002/alz.13026>
- Theune, C. (2023). *pycountry: A Python library to access ISO country, subdivision, language, currency and script definitions and their translations*. Retrieved January 1, 2024 <https://github.com/flyingcircusio/pycountry>
- van Veen, R., Biehl, M., & de Vries, G. J. (2021). sklvq: Scikit Learning Vector Quantization. *Journal of Machine Learning Research*, *22*(231), 1–6.

- Vidushi, M., Akash, R., & Shrivastava, A. K. (2020). Diagnosis of Alzheimer Disease using Machine Learning Approaches. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(04), 7062–7073.
- Wimo, A., Seeher, K., Cataldi, R., Cyhlarova, E., Dielemann, J. L., Frisell, O., Guerchet, M., Jönsson, L., Malaha, A. K., Nichols, E., Pedroza, P., Prince, M., Knapp, M., & Dua, T. (2023). The worldwide costs of dementia in 2019. *Alzheimer's and Dementia*, 19(7). <https://doi.org/10.1002/alz.12901>
- XGBoost Documentation. (2024). Retrieved January 1, 2024 <https://xgboost.readthedocs.io>
- Xu, X., Lin, L., Sun, S., & Wu, S. (2023). A review of the application of three-dimensional convolutional neural networks for the diagnosis of Alzheimer's disease using neuroimaging. *Reviews in the Neurosciences*, 34(6), 649–670. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2022-0122>
- Zhang, X., Chen, X., Yao, L., Ge, C., & Dong, M. (2019). Deep Neural Network Hyperparameter Optimization with Orthogonal Array Tuning. *International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2019)*, 287–295. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36808-1_31



IMAGE MATCHING BASED HAZARDOUS MATERIAL DETECTION AND WARNING SYSTEM*

GÖRÜNTÜ EŞLEŞTİRME TABANLI TEHLİKELİ MADDE TESPİT
VE UYARI SİSTEMİ

Fatma Betül OKUR¹

Can EYÜPOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1469991>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
ceyupoglu@hho.msu.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
17.04.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
06.06.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
26.06.2024

Abstract

Transportation of dangerous goods involves many critical situations that require safety and special precautions. In accordance with the regulations, hazardous materials, which include international standards, should be closely monitored and precautions should be taken in advance according to the situation. Artificial intelligence, image processing and data analysis techniques can be used to recognize and classify the labels of dangerous goods. This is important for early action in case of an emergency. If hazardous materials are not properly stored or transported according to safety precautions and rules, they can cause both material and moral damage. In this study, a hazardous material detection and warning system using AKAZE, ORB and SIFT image feature matching techniques is developed. To test the system, a dataset of multiple hazardous material labels with different scenes and conditions was created. The performances of feature matching techniques including image processing algorithms are examined through comparative analysis. As a result of image matching, label-related features and intervention information were retrieved from the database and displayed on the system interface. Experimental results show that the ORB technique is the best method for feature matching and accurate matching, and the AKAZE technique is the fastest feature detection method.

Keywords: Image processing, image feature matching techniques, AKAZE, ORB, SIFT, hazardous materials.

Öz

Tehlikeli maddelerin taşınması güvenlik ve özel önlemler gerektiren birçok kritik durumu içermektedir. Mevzuatlar gereğince uluslararası standartları içeren tehlikeli maddeler yakından takip edilmeli ve duruma göre önceden önlemler alınmalıdır. Yapay zeka, görüntü işleme ve veri analizi teknikleri, tehlikeli maddelerin etiketlerini tanıma ve sınıflandırma konusunda kullanılabilir. Bu durum acil müdahale anında erken hareket etmek için önemlidir. Eğer tehlikeli maddeler güvenlik önlemlerine ve kurallarına göre uygun depolanmazsa veya taşınmazsa hem maddi hem de manevi zarara yol açabilmektedir. Bu çalışmada AKAZE, ORB ve SIFT görüntü özellik eşleştirme tekniklerini kullanan tehlikeli madde tespit ve uyarı sistemi geliştirilmiştir. Sistemi test etmek için farklı sahneleri ve koşulları içeren birden fazla tehlikeli madde etiketinden elde edilen bir veri seti oluşturulmuştur. Karşılaştırmalı analizler ile görüntü işleme algoritmalarının içeren özellik eşleştirme tekniklerinin performansları incelenmiştir. Görüntü eşleştirmesi sonucunda veri tabanından, etiketle ilgili özellikler ve müdahale bilgileri alınarak sistemin arayüzünde görüntülenmesi sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar ORB tekniğinin özellik eşleştirmesi ve doğru eşleme konusunda en iyi yöntem olduğunu ve AKAZE tekniğinin en hızlı özellik bulan yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, görüntü özellik eşleştirme teknikleri, AKAZE, ORB, SIFT, tehlikeli maddeler.

* This article is derived from Fatma Betül OKUR's Master's thesis at National Defence University, Atatürk Strategic Studies and Graduate Institute, Computer Engineering Master's Program.

¹National Defence University, Atatürk Strategic Studies and Graduate Institute, Department of Computer Engineering, İstanbul, Türkiye. fbetyildiz@gmail.com, Orcid.org/0009-0008-6310-4524.

²National Defence University, Turkish Air Force Academy, Department of Computer Engineering, İstanbul, Türkiye. ceyupoglu@hho.msu.edu.tr, caneyupoglu@gmail.com, Orcid.org/0000-0002-6133-8617.

1. INTRODUCTION

The identification and proper characterization of hazardous substances are critical for industrial safety, public health, and environmental protection. Nowadays, hazardous material labels appear in many areas almost every day (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). The transportation of hazardous materials involves both a challenging process and considerable risks. It is not possible to give up many tools that make our lives easier, such as cell phones, computer batteries, chemicals, gases, and explosives. These substances have become an integral part of our daily lives (U.S. Department of Transportation Federal Motor Carrier Safety Administration, 2022). Preventing or minimizing the hazards that may arise during the use and transportation of these substances requires an important area of expertise in terms of human health and the environment (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Accidents during the transportation of hazardous materials are usually caused by the lack of coordination, ignorance, and carelessness of employees (National Academies of Sciences Transportation Research Board and National Research Council, 2010). Some hazardous materials transported in containers can lead to incidents such as leakage, explosion, and combustion. As a result of these accidents, it is inevitable that the material being transported and the employees working in the field will be damaged. In order to prevent such accidents, solutions should be developed to increase automation and reduce manpower in the field. Because the higher the human factor in these areas, the higher the risk. In this context, measures can be taken with solution proposals on issues such as storage of hazardous substances in accordance with the legislation, rapid intervention in case of an accident, and informing the relevant persons (U.S. Department of Transportation, 2004). After employees are warned about these regulations, coordinated information on emergencies, risks, and protective actions should be provided (Fingas, 2002). Image processing techniques can be used for the detection and evaluation of hazardous substances against potential problems of hazardous substances. This is done on the dataset, which is realized by pixel-based preprocessing. An alternative approach is to analyze the images by training a machine learning model on the datasets.

This study is associated with the database within the scope of the performance of matching algorithms within image processing techniques. The target audience consists of employees transporting hazardous materials. Safe stacking and storage of hazardous materials requires knowledge of their characteristics and potential hazards (Sharifi, 2021). It is extremely important to know how to intervene if an emergency occurs during stacking and storage. Within the scope of the proposed study, a study is carried out by addressing the placement areas of hazardous substances, how these substances can be distinguished in containers, and how they require intervention. Containers have ADR (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road) and IMDG (International Maritime Dangerous Goods) Code labels showing the hazard class information of the transported substances. These labels provide information on the hazardous status of the substance and how to intervene with the hazardous substance. In this study, a database containing the hazard status of the substance and response methods is created according to these labels. Although there are not many similar studies, there are some examples in the literature on hazardous material transportation (Ellena et al., 2004; Brylka et al., 2021). The aims and contributions of the study are as follows:

- **Dataset Collection and Performance Measurement:** The dataset based on hazardous material labels was collected over different scenes, and the performance of the matching algorithms was evaluated.
- **Image Processing-Based Approach:** An image processing-based approach is proposed for the detection and feature recognition of hazardous substance labels.
- **User-Oriented Interface Design:** The performance of the matching algorithms was evaluated by designing a user-oriented interface based on fast information access.

The content of the study was organized as follows: In Section 2, the feature matching techniques are mentioned. Section 3 includes a literature review related to the study topic. Section 4 presents the dataset used and the proposed approach. Section 5 contains the experimental results and discussions. Finally, Section 6 summarizes the conclusions of the study.

2. FEATURE MATCHING TECHNIQUES

2.1. Working Principles of Feature Matching Techniques

Feature matching techniques are algorithms used to determine the unique features of an object in object detection. Using OpenCV's feature detection capabilities, these techniques find similar features on the image and place them in the corresponding area. This process is similar to putting the pieces of a puzzle together. While humans perform this process instinctively, for a computer to understand this process, certain features need to be searched for and found. In feature matching techniques, vertices are used as unique features. Since corners are interesting features in an image, feature detection algorithms usually start by detecting corners. The reason for using corners is that they always contain the same features in other areas. For this purpose, many techniques have been proposed using OpenCV's features. These techniques include Harris corner detection, Shi-Tomasi corner detection, BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), AKAZE (Accelerated KAZE), SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), SURF (Speeded-Up Robust Features), FAST (Features from the Accelerated Segment Test) algorithm for corner detection, and ORB (Oriented FAST and Rotated Brief). SIFT and SURF are patented techniques and are not free for commercial use. Table 1 provides detailed information about feature matching techniques. All these techniques are used for corner detection. Feature matching is performed with Brute-Force (BF) and FLANN (Fast Library for Approximate Nearest Neighbors) based matchers. BF Matcher matches each of the features and keeps track of the matches by rotating them by distance. It is slow because it looks for each point. FLANN, on the other hand, looks at the nearest neighbors and optimizes accordingly. This makes it faster than BF.

Table 1. Feature Matching Techniques

| Feature Matching Techniques | Author(s) | Year | Function |
|---------------------------------------|-------------------|------|---|
| Haris corner detection | Harris & Stephens | 1988 | The Harris algorithm measures the similarity of a pixel in an image in a certain direction and to an edge and uses the measured corner strength value for edge or corner detection. A corner is detected when the corner strength value is above a specified threshold and significantly different from other pixel values. It is represented as the <code>cv2.cornerHarris()</code> function in the OpenCV library. |
| Shi-Tomasi corner detection | Shi & Tomasi | 1994 | It includes an algorithm that works better by modifying and improving the function that gives the corner strength value in the Harris corner detector. It is represented as the <code>cv2.goodFeaturesToTrack()</code> function in the OpenCV library. |
| SIFT | Lowe | 1999 | It uses the Gaussian function to detect features of different scales in the image and blur them. It detects feature points using the difference of Gaussian (DoG). False values are eliminated with key points whose location and scale are determined. Gradient orientation histogram values are calculated for the key points. Descriptors and detection values are generated according to the orientation information. It is represented as <code>cv2.SIFT_create()</code> function in the OpenCV library. |
| LBP (Local Binary Patterns) | Ojala et al. | 2001 | It shows the intensity values of neighboring pixels around each pixel in the image in binary patterns. The binary patterns are then transformed into a histogram to obtain feature vectors. It is represented as the <code>cv2.LBP_create()</code> function in the OpenCV library. |
| HOG (Histogram of Oriented Gradients) | Dalal & Triggs | 2005 | By measuring edge and intensity changes in images, it generates feature vectors that identify objects. HOG features are often used in combination with machine learning algorithms such as Support Vector Machines (SVM) for object recognition and classification. It is not an efficient algorithm for large images and real-time applications. It is represented as the <code>cv2.HOGDescriptor()</code> function in the OpenCV library. |

| | | | |
|---|--------------------|------|--|
| SURF | Bay et al. | 2006 | The box-filtered convolution computes scale space extrema using integral images. Using the determinant of the Hessian matrix for both scale and position, the constraints and scale of key points are determined. Many features are added at each step to increase speed. Good for blurred images and rotated images. It is slower than SIFT and optimized for use in real-time applications. It is represented as the <code>cv2.xfeatures2d.SURF_create()</code> function in the OpenCV library. |
| FAST | Rosten & Drummond | 2006 | In the FAST algorithm, a circle of 16 pixels is drawn around the point on the image, and the brightness of the point and the surrounding pixels are compared to find the corner point. If a certain number of pixels around the center point are brighter or darker than a set threshold, the center point is considered a corner. It is several times faster than other existing corner detectors but is not robust to high noise levels. They are not fast enough for real-time implementation. It is represented as the <code>cv2.FastFeatureDetector_create()</code> function in the OpenCV library. |
| BRIEF | Calonder et al. | 2010 | It uses binary patterns to detect important points in images. These patterns are created by comparing the intensities of different regions in the image. It is a particularly fast algorithm. BRIEF is preferred in real-time applications for tasks such as image matching and object recognition. It is represented as the <code>cv2.xfeatures2d.BriefDescriptorExtractor_create()</code> function in the OpenCV library. |
| BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) | Leutenegger et al. | 2011 | BRISK is a fast and computationally efficient feature descriptor that is robust to rotation and scale changes. It is suitable for real-time applications. It can sometimes produce incorrect results in noisy images. It is represented as the <code>cv2.BRISK_create()</code> function in the OpenCV library. |
| ORB | Rublee et al. | 2011 | ORB is a combination of the FAST and BRIEF algorithms and aims to overcome their shortcomings. It first uses FAST to find key points, then applies the Harris corner measure to find the first N points between them. With BRIEF, the patches around the key point are identified in binary. The rotation is robust to scale change and is fast and computationally efficient. It is represented as the <code>cv2.ORB_create()</code> function in the OpenCV library. |

| | | | |
|-------|---------------------|------|---|
| AKAZE | Alcantarilla et al. | 2013 | It is an accelerated version of the KAZE (KAZE Enhanced Zernike) algorithm. It uses a non-linear diffusion filter to detect important points in the image. It detects corner points by creating a hessian matrix with linear filtering in scale space. It is represented as the cv2. AKAZE_create() function in the OpenCV library. |
|-------|---------------------|------|---|

There are several reasons for using the AKAZE, ORB, and SIFT methods in this study:

- AKAZE uses a non-linear filter, which provides the advantage of preserving details and accurate feature point detection. It is more suitable for real-time applications due to its fast detection capability. Since the proposed system is a real-time application, the ORB method is preferably chosen.
- ORB method is an optimized method based on speed. It gives faster results compared to SIFT and SURF. Along with speed, it also makes accurate matches. ORB, like AKAZE, performs well when evaluated in terms of rotation and scale. In the proposed study, ORB was chosen because the dataset consists of images from different scenes and different angles. Because it represents a robust method in terms of rotation and scale.
- SIFT is a good method in terms of feature matching. It is highly discriminative in terms of scale, rotation, and affine transformations. It can perform well in complex scenes. Since a good method in terms of both scene and scale will be preferred in this study, SIFT was used.
- Methods such as SURF and BRISK give very good results. However, they do not perform very well in terms of computation and memory compared to methods such as AKAZE and ORB.
- AKAZE and ORB are methods that give fast results. Speed is an important factor in real-time applications. The proposed work has to be fast because it provides simultaneous information to the user on an interface.
- BRIEF is a fast-computing method. The SIFT method is preferred because it produces detailed descriptors for complex and different scenes. SIFT was chosen because the study includes datasets from different scenes.
- The FAST method is also a method that produces fast results. However, it does not perform well according to scale or rotation. AKAZE, ORB, and SIFT are more robust in scale, rotation and affine transformations.

2.2. Advantages of Feature Extraction and Matching Algorithms

Feature extraction algorithms and matching algorithms are advantageous in image processing, machine learning, and other fields:

- Reduces data size by transforming complex structures on the image into simple and meaningful features.
- By finding the features, patterns, and corners of interesting areas in images with algorithms, it enables object detection from different angles and under different lighting conditions.
- Feature extraction algorithms perform well in changes such as rotation, scale, and reflection. This is important for object detection.

- Some feature extraction algorithms perform well in fast and real-time applications, extending the use case.
- Feature matching algorithms are generally less complex and capable of direct implementation. They can be implemented quickly in small and medium projects.
- There is no need for model training or lengthy tuning.
- Algorithms are easier to understand, interpretable, and explainable. Results are easy to interpret.

Feature matching algorithms have disadvantages as well as advantages. They are fast, computationally efficient, and easy to implement. However, high accuracy and generalization capabilities such as machine learning may not be available in some cases. This may vary depending on the subject being studied. Machine learning involves a large dataset, and a complex system with a lot of computational capacity. Which method to use depends on the requirements of the application, the dataset and the available computational resources. Since the proposed work does not consist of a very complex process, using image processing techniques was deemed appropriate for this system.

3. LITERATURE REVIEW

There are many academic studies and applications for the use of feature matching techniques on different datasets in different fields. Recently, there have been many studies in the literature that aim to improve target detection and recognition processes using image feature matching techniques. These improvement efforts aim to increase the detection accuracy and reduce the completion time of the study.

Tareen and Saleem (2018) reviewed different techniques for feature matching algorithms. They used SIFT (Lowe, 1999), SURF (Bay et al., 2008), ORB (Rublee et al., 2011), KAZE (Non-linear Scale-Space Feature Detection) (Alcantarilla et al., 2012), AKAZE (Alcantarilla et al., 2013), and BRISK (Leutenegger et al., 2011) as feature matching techniques and evaluated the performance of each of them. The results showed that ORB, BRISK, and SURF techniques are capable of detecting more features than the others. In addition, SIFT, SURF, and BRISK are less variable in terms of scale and perform better, while ORB shows less scale variation. In terms of speed, AKAZE, KAZE, SIFT, ORB, BRISK, and SURF obtained the results in order from fastest to slowest. Kamel et al. (2020) pointed out the shortcomings of feature matching techniques in previous studies and proposed a hybrid method. They conducted separate experiments on ORB, BRISK, AKAZE, SIFT, and SURF feature descriptors and presented the comparison results. In the studies performed on the SRM dataset, the ORB algorithm had the fastest execution time, followed by the BRISK algorithm. SIFT algorithm detected the most keypoints, while AKAZE detected very few keypoints. In the Airport dataset, the BRISK algorithm has the fastest execution time, while the SURF algorithm is the slowest. In the hybrid study, the ORB-BRISK pairing performed better, while AKAZE-SURF was the slowest and did not perform well. Tareen and Raza (2023) evaluated the potential of 14 feature detectors and 10 feature matchers, including SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, BRISK, AGAST (Adaptive and Generic Accelerated Segment Test), FAST, MSER (Maximally Stable Extremal Regions), MSD

(Maximally Stable Disjoint Regions), GFTT (Good Features To Track), Harris Corner Detector based GFTT, Harris Laplace Detector, and CenSurE. The results showed that SIFT outperformed SURF in detecting large feature matches with low parameter thresholds. AKAZE detected fewer features than KAZE in all 10 scenes. The overall ranking was MSD, MSER, CenSurE, FAST, AGAST, SIFT, ORB, BRISK, GFTT, GFTT-H, KAZE, AKAZE, SURF, and Harris-L. These results were evaluated separately on invisible dusty, smoky, dark, noisy, blurry, sunny, shadowy, and close-up images in a variety of environments. SIFT was found to perform well for most scenes, while MSD, MSER, SIFT, KAZE, GFTT, and CenSurE were found to be good at high keypoint selection. Comparative studies in the literature differ according to the subject matter. For example, Oad et al. (2022) focused on brain images and showed comparative performance metrics of brain hemorrhage status with matching methods. Ihmeida and Wei (2021) performed performance evaluations using matching methods on remote sensing images. Similarly, Forero et al. (2021) comparatively tested matching methods on multispectral images for rice crop detection. Working on noisy images, Kortli et al. (2018) showed that ORB works fast and SIFT performs better. They also pointed out that the two methods are approximately similar in terms of matching. Apart from matching methods, artificial intelligence methods have also been applied to improve the performance of hazardous substance labeling detection by applying artificial intelligence methods to noisy data (Brylka et al., 2021). During the evaluation, it was observed that the success criteria of the matching algorithms differed depending on the topics studied. The parameters may vary depending on the study situation and affect the performance of the matching methods.

Clear and accurate labeling of hazardous materials can help prevent potential accidents. Separation of items that can and cannot be stored next to each other and careful control of check-in and check-out processes are important to minimize risks. Damage records should be checked meticulously. These controls and transportation processes are carried out with special training (Brylka et al., 2021). The new technologies developing today should be taken into account in addressing these issues related to hazardous materials. In this work, a fully automated approach for various detection and analysis tasks is presented. The transportation and labeling of hazardous materials are based on international global standards (UNECE, 2024). Each country develops solutions for its own transportation within the framework of internationally standardized rules. Lu et al. (2019) compared the relevant rules of the International Maritime Organization (IMO) with the existing rules and standards in China and presented the results in a table. The U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration has a database of US safety information that is kept up-to-date by analyzing the statistics of incidents involving hazardous materials by year (U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, 2022). Access to all and many statistical data is provided. Another study examining the effects of hazardous material transportation in Thailand analyzes and evaluates the data obtained through field work and provides recommendations on the current situation (Watcharejyothin et al., 2022). Literature studies on hazardous materials show that it is a very important area that requires attention.

The proposed work is realized within an interface. Previously, Ellena et al. (2004) developed a system for the detection of trucks carrying dangerous goods. This system evaluates the labels on the truck according to the hazardous material label and labels

them as hazardous on the interface. As a result of the studies on matching methods in the literature, our current study aims to match hazardous material labels between images simultaneously and display the emergency response measure information stored in the database on the interface. The proposed work also shows the performance parameters of the matching methods on the interface. The image data contains different backgrounds and was evaluated by giving parameter values according to these different backgrounds. Thus, it was aimed at obtaining a more general result.

4. DEVELOPED HAZARDOUS MATERIAL DETECTION AND WARNING SYSTEM

In this study, AKAZE, ORB, and SIFT feature extraction algorithms were used to detect hazardous substance labels. These algorithms were chosen to identify the unique features of the labels and to accurately detect the labels using these features. The detected hazardous substance labels are matched with the relevant database information and provide the user with information for warnings and precautions. This model was based on success comparisons using feature matching to accurately detect hazardous material labels. Hazardous materials need to be transported and stored safely. The performance of the model was evaluated using various metrics. Particular attention was paid to speed and matching points. The dataset used images taken under various backgrounds and conditions.

The dataset, which constitutes the main source of the study, was tested for different methods in the interface program. Method successes and performances were obtained, and the results were detailed under other headings. All these operations were performed on an interface designed by a Qt designer. First, the test data is selected, then the folder containing the training data is selected, and the matching result parameters and run time information are displayed on the screen.

4.1. Dataset Description

The dataset used for the study consists of Google images and a structure used for an article. This dataset was used for hazardous material detection and database mapping. The data in the database include the emergency response situations caused by the hazardous substance and the properties of the hazardous substance. Hazardous material labels appear in various fields of our daily lives. These labels, in different formats and with international standards, are used in port, road, rail, and, to a lesser extent, air transportation. Hazardous material labels are of great importance today in terms of safety and security, both in robot rescue systems and in reporting the dangerous status of materials transported by humans. Image processing, computer vision, and artificial intelligence methods play an important role in the detection and recognition of such important labels and the creation of an intervention warning system. In this study, a comparative warning system was created based on matching algorithms used in image processing.

This system should basically provide the key features created in the database. Also, it should be measured to see how it reacts when the images vary in terms of their size and attribute characteristics. In terms of requirements, the dataset collected basically meets

the needs within the scope of the research topic. It provides a scientific contribution to the identification and matching of hazardous substances.

4.1.1. Data collection

This study was created by selecting images expressing hazardous substance labels from Google Images and collecting them from the websites where the datasets are available (Mohamed et al., 2018). The dataset consists of data with different backgrounds and taken from different angles. In total, 600 images were collected. The background consists of hazardous material labels placed on sawdust surfaces, wooden structures, and brick wall structures. The images obtained from Google Images include images with labels on containers and images with hand-held labels. The dataset is based on 8 different types of flammable materials. All images are high resolution (5184x3456), with different lighting conditions (dark, light), and blurred. The images were obtained by creating different scenarios (Mohamed et al., 2018). The performance of the methods presented in the related study on the collected data was evaluated. Before using the raw data directly, certain image preprocessing methods were used to output the proposed methods. This is because cleaning the areas that are not considered important in the images to get better results from the images has a positive effect on the method. The images were converted to black-and-white images. Table 2 gives an overview of the dataset collection.

Table 2. Dataset Collection Overview

| Session | Image | Quantity |
|---------|-------------------------------------|----------|
| 1 | Hazardous Material Labeling Dataset | 600 |
| 2 | Google Images | 100 |

4.1.2. Data preprocessing

Within the scope of the study, certain image processing steps were applied to each method without performance evaluations. After pre-processing, each image taken from the test data was matched using matching algorithms on the training data. The matched image was retrieved from the database, and its information was reflected on the interface system. The splits for the training and test datasets to be used for the warning system are presented in Table 3. It was resized to 225x225 pixels for matching images. The collected dataset was divided into training (83%) and test (17%).

Table 3. Dataset Splits for Train and Test

| Task | Train Samples | Test Samples |
|----------------|---------------|--------------|
| Label matching | 500 | 100 |

4.2. Breakdown of the Tasks

Within the scope of the study, depending on the matching algorithms on the interface program, information based on emergency response situations is retrieved from the database and displayed simultaneously on the interface. AKAZE, ORB, and SIFT

matching methods were preferred in the system. In order to find images similar to the image given as each test data and to determine the characteristics of hazardous materials, the relevant response information for hazardous materials is extracted from the database depending on the UN (United Nations) number and reflected on the screen. The parameters of the three methods were tested, and the best matching parameters and threshold values were determined. Figure 1 shows the overall flowchart of the designed and pro-posed system.

4.2.1. Models and algorithms

In the image processing process, we focused on AKAZE, ORB, and SIFT matching methods based on the OpenCV library in Python programming language. AKAZE is an algorithm for find-ing specific features in an image. Alcantarilla et al. (2013) presented the AKAZE algorithm by im-proving the KAZE algorithm (Alcantarilla et al., 2012). This algorithm is based on nonlinear diffu-sion filtering. It produces more efficient results with Fast Explicit Diffusion (FED) in AKAZE. The descriptor of AKAZE is based on the Modified Local Difference Binary (MLDB) algorithm and the determinant of the Hessian Matrix, which is also highly efficient (Tareen & Raza, 2023).

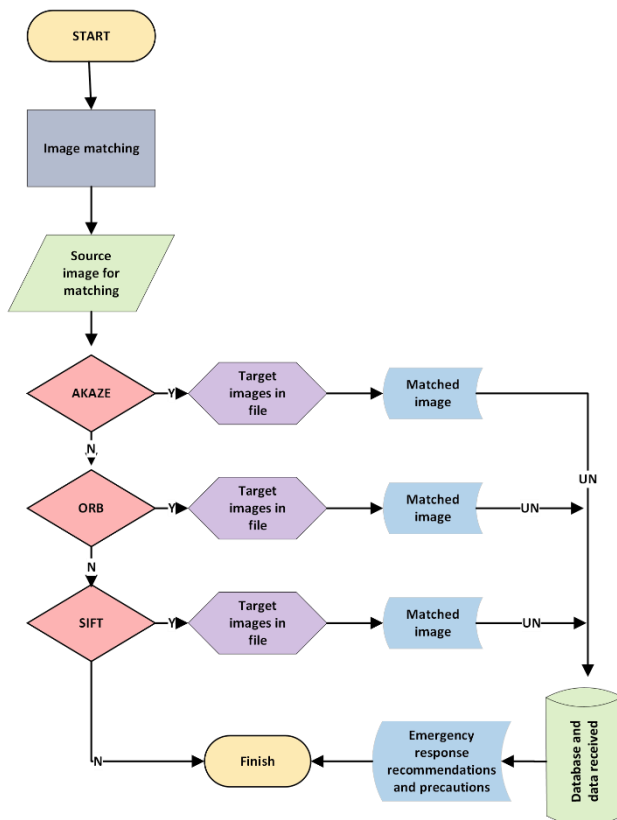


Figure 1. Flowchart of the Developed System

Lowe (1999) introduced the SIFT method, which has been used in many studies. The SIFT detector is based on the DoG operator, an approximation of the Laplacian-of-Gaussian (LoG) (Tareen & Raza, 2023). It finds and detects local maxima in images of various scales using DoG. However, its disadvantage is its high computational cost.

Rublee et al. (2011) presented a method called ORB. It first detects key points in images using the FAST algorithm and then calculates BRIEF apertures around these key points. It detects FAST corners at each layer of the scale pyramid and evaluates the corners of the detected points using the Harris Corner score to filter out the highest quality points (Tareen & Raza, 2023). ORB features are independent of scale, rotation, and limited affine changes. It is the fastest and most efficient algorithm. ORB works faster than SIFT and SURF and is especially suitable for real-time applications and resource-limited systems. The general flowchart of the matching algorithms implemented on the interface is shown in Figure 2.

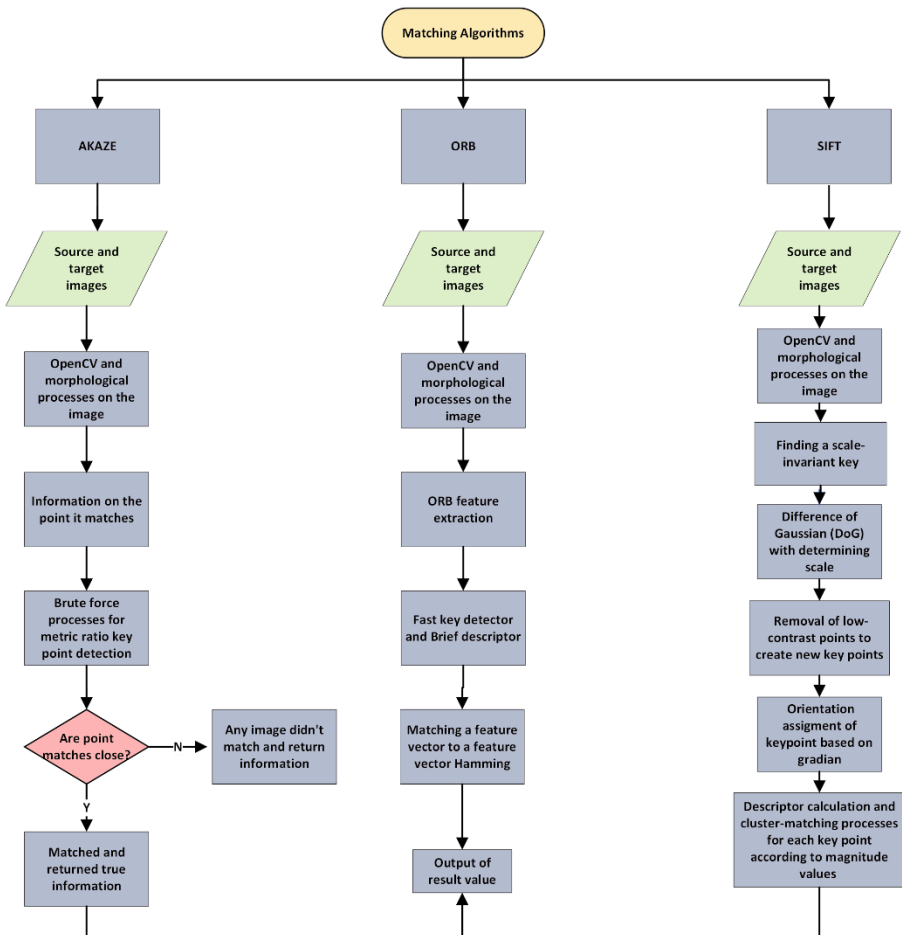


Figure 2. General Flowchart of Matching Algorithms

These methods are widely used in computer vision applications. They are frequently encountered in tasks such as object recognition, image matching, 3D modeling, and motion analysis. Each method has advantages and disadvantages. Which one to use depends on the requirements of the application, the computational power, and the characteristics of the dataset. The parameters used in these methods are given in Table 4. In the AKAZE method, BruteForce is calculated using the Hamming distance relation. Hamming distance calculates the number of different bits between two attribute vectors. Hamming distance is usually used on binary attributes (e.g., ORB, BRIEF). With the near-est matching method, the number of neighbors between two images is determined. For the pro-posed work, this value is taken as two. This returns the two closest matching points for each refer-ence point. The nearest neighbor matching ratio is set to 0.8. This ratio is considered the threshold for whether matching points will be retrieved when using the nearest neighbor matching algorithm. It prevents situations that can sometimes be caused by false matches. If the given ratio is greater than the resulting ratio, the matching is accepted. The inlier threshold was given a value of 2.5 as a distance threshold used to determine the inlier points with homography control. Homography de-scribes the perspective transformation between two different images.

If the average matching value after matching is greater than 49, the match is considered correct. This value is determined by testing images within the system. In the ORB method, the BruteForce value is determined using the Hamming norm. Cross-validation is performed with the value, and if the resulting matching score is greater than 108, the match is considered correct. In the SIFT meth-od, BruteForce is calculated using Norm-L2. Cross-validation is performed, and if the resulting value is greater than 108, the match is considered correct. Table 4 shows the parameters and values used in the system.

Table 4. Base Model Information for the Classification Task

| Method | OpenCV's Constructor Settings |
|--------|--|
| AKAZE | <code>cv2.AKAZE(cv.DescriptorMatcher_BRUTEFORCE_HAMMING, knnMatch(desc1, desc2, 2), match_ratio = 0,8, inlier_threshold = 2.5, Match>=49)</code> (OpenCV, 2024a). |
| ORB | <code>cv2.ORB(cv2.BFMatcher(cv2.NORM_HAMMING, crossCheck = True), Match>= 108)</code> (OpenCV, 2024b). |
| SIFT | <code>cv2.SIFT(cv2.BFMatcher(cv2.NORM_L2, crossCheck=True), Match>= 108)</code> (Tareen & Saleem, 2018) |

After the method outputs, a matching process was performed on a simple database created in advance. The unique identifiers of the hazardous substances were determined, and the tables were linked to each other. Important warning information such as physical and chemical information about hazardous substances, safety warnings, first aid information, what to do in case of emergency, compatibility information of hazardous substances with other substances, and cleaning of hazardous substances were recorded in the database. The data model was designed according to this information and a useful design was created. Data information was entered into the system by considering the data query situation. According to the uniquely selected UN

number, access to the database is made, and querying and feature matching is performed. All these situations are realized simultaneously on the interface, and the information is reflected in the relevant fields on the interface.

4.2.2. Evaluation metrics

Evaluation of matching algorithms involves the use of various metrics. Firstly, the accuracy of the algorithms is measured using the accuracy metric, which determines how accurately the algorithms perform matching on a specific application or dataset. Accuracy is calculated based on the images and matching values simultaneously reflected in the system. Values higher than the given matching value for each method indicate the correctness of the match. However, sometimes a match may appear to be correct but may not actually reflect the matched value, making the match unacceptable. In this case, the system compares the images considered to be matched with the actual images, and when there is a false match, these images are labeled as unmatched. Accordingly, the average accuracy value is calculated for each method.

The speed metric expresses the processing time of the methods simultaneously running on each image. In the proposed study, the total processing times for feature extraction and matching are evaluated separately for each image and method, and the average processing time is calculated. Processing speed evaluations are based on the time spent on each image. The processing power of methods is directly proportional to speed.

The repeatability metric measures whether the same features can be correctly identified in different images. This was tested and evaluated on the proposed system by providing images taken in different scenes. The evaluation of noise resistance involved assessing the results obtained from the images against noise.

5. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

Feature matching methods are applied in various fields, and some applications are of critical importance. In this study, the effects of AKAZE, ORB, and SIFT feature matching methods on hazardous material labels are evaluated. The accuracy metrics are measured by taking into account the evaluation metrics given earlier, and the results are presented in Figure 3 and Table 5. The collected dataset was divided into training (83%) and test (17%) images, and matching methods (AKAZE, ORB, SIFT) were applied. The results were meticulously evaluated. The AKAZE method showed an average accuracy of 33%, the ORB method showed 91%, and the SIFT method showed 68%. The ORB method achieved the highest performance, demonstrating its efficiency. It resulted in a 9% error rate by matching with too many points and considering those matches as correct, exceeding the threshold. Additionally, the average execution times are presented in Figure 3. Although AKAZE has the fastest processing time, it produces incorrect results. The processing time for SIFT is considerably long.

Overall, when error rates were evaluated, it was observed that the error rate increased when scene conditions changed, along with an increase in processing power. It was also noted that matching algorithms alone were not sufficient for images taken in noisy environments. ORB and SIFT performed almost equally well in noisy images. When

the results were evaluated, AKAZE showed the lowest performance. AKAZE provides more accurate feature detection by using nonlinear diffusion filters. However, the computational cost and performance may decrease. The ORB algorithm shows the highest performance. ORB is fast and robust to rotation and scale changes. SIFT showed moderate performance. SIFT's strengths are robust to scale and rotation but limited in computational cost and speed.

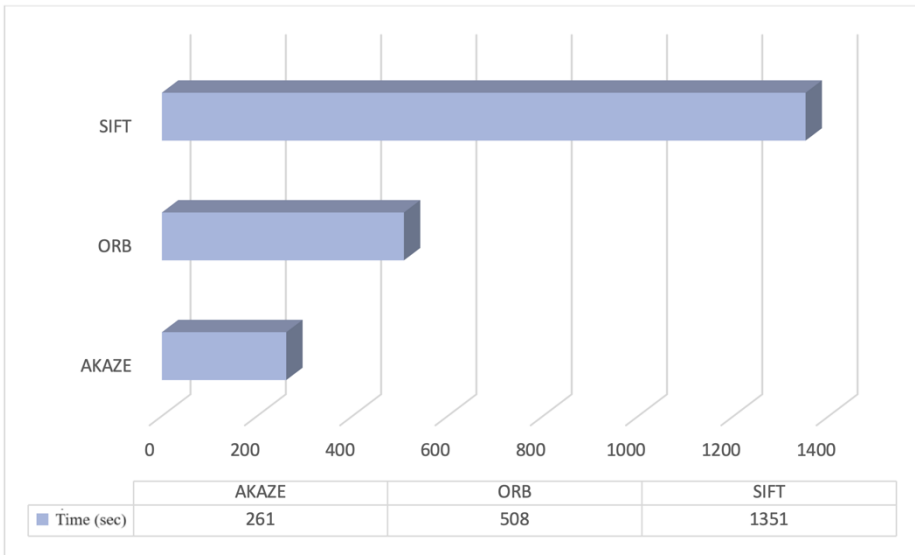


Figure 3. Execution Time Graph of AKAZE, ORB, and SIFT Methods

Three different matching methods were used for the classification of hazardous material labels. These methods enabled the identification of hazardous material properties and provided representation in the system for intervention measures. The accuracy results are presented in Table 5.

Table 5. Accuracy Results for the Classification Task

| Base Model | Accuracy |
|------------|----------|
| AKAZE | 33% |
| ORB | 91% |
| SIFT | 68% |

According to the results in Table 5, ORB demonstrated high performance by matching the most features and achieving accurate matches. While AKAZE showed lower performance in terms of feature matching and accurate matching, it performed well in terms of speed. When evaluating the results, it is observed that as scene conditions change, feature matching and performance decrease, resulting in a decrease in the matching ratio. These observations align with the findings from the literature review. Two main issues related to feature matching have been identified:

- Scene diversity: It reduces feature matching in matching methods and decreases the number of features. To address this issue, accuracy can be improved by adjusting parameter values and expanding them with new values.
- Noisy environment: In such environments, matching results vary when the object threshold decreases. Preprocessing the image and adjusting the parameters used in matching can provide a solution to this issue.

Figures 4 and 5 show the interface screens of the developed system. Figure 4 shows the interface where the labels collected and created for hazardous substance detection are detected. Figure 5 shows the classification and warning interface screen, where the results of matching the label detected in Figure 4 with the database are displayed on the screen. In Figure 4, images and the feature matching method are selected to extract information from the image. There is also a time counter here. In Figure 5, there is a separate button for each warning. Whichever information is needed, the information is reflected on the screen by pressing the button.

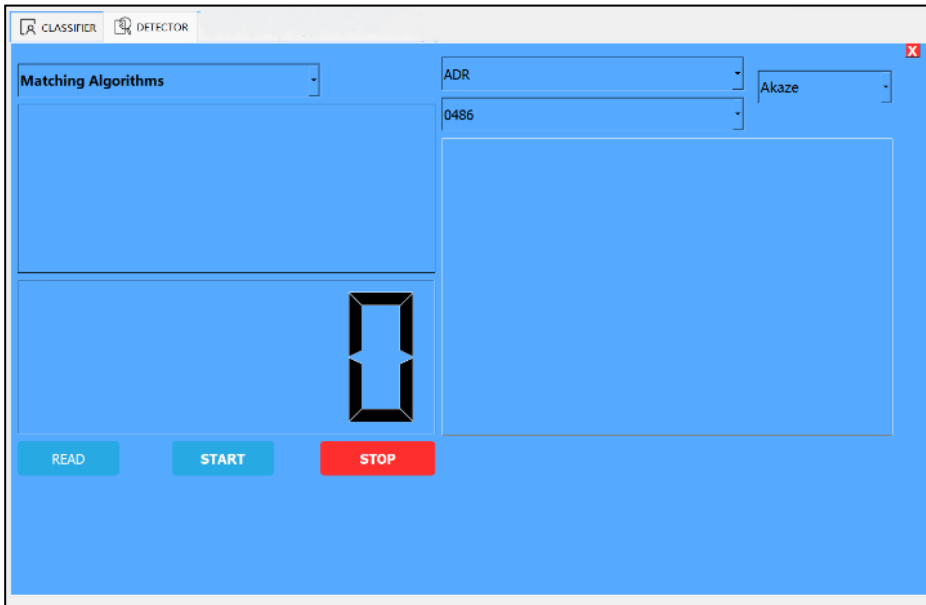


Figure 4. Label Detection Interface Screen

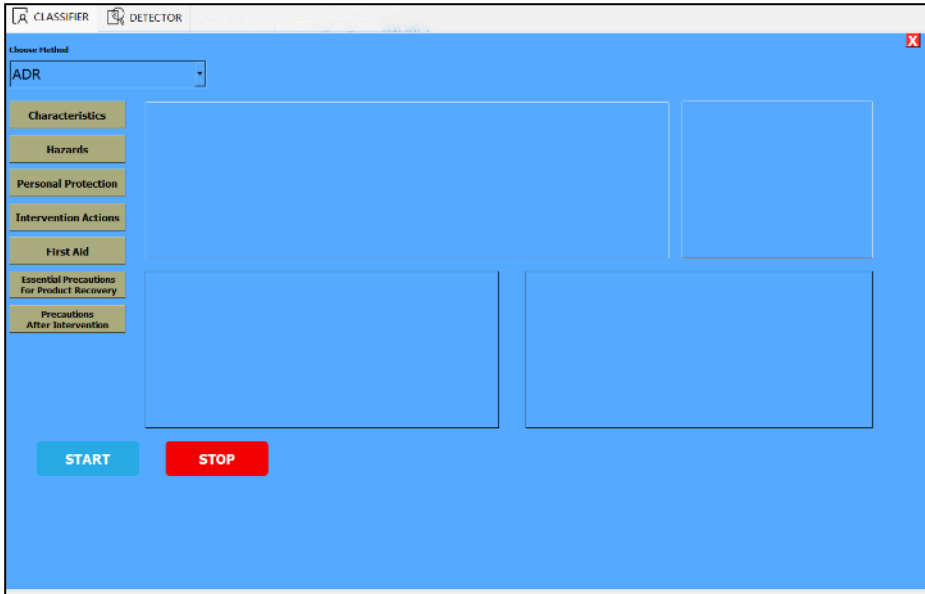


Figure 5. Classification and Warning Information Interface Display

6. CONCLUSION

This study focuses on the utilization of a dataset collected for the detection of hazardous material labels and the application of matching methods. The matching results are compared and evaluated against the features and intervention data concurrently retrieved from the database. This comprehensive research underscores the contemporary significance of hazardous materials and contributes to a systematic understanding of image processing techniques for their detection. Performance analyses conducted on the dataset containing various scenes and noise data present a comparative performance of matching methods and feature-intervention information in the database. In future studies, the integration of these label systems with barcode technology to transform them into robotic systems is recommended. This is crucial for reducing human intervention in hazardous material transportation and introducing semi-automatic systems to our country.

While the current system covers a section of transportation, it is envisaged to form a chain of inter-connected systems that will create a seamless and integrated network. Representing the next level of comprehensive hybrid technology, the system is expected to seamlessly integrate with the existing framework in today's transportation.

Contribution of The Authors

The authors confirm that they equally contributed to this paper.

Acknowledgements

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

- Alcantarilla, P. F., Bartoli, A., & Davison, A. J. (2012). KAZE features. In *Computer Vision–ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012, Proceedings, Part VI 12* (pp. 214-227). Springer Berlin Heidelberg.
- Alcantarilla, P., Nuevo, J., & Bartoli, A. (2013). Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces. *Proceedings of the British Machine Vision Conference 2013*.
- Bay, H., Tuytelaars, T., & Van Gool, L. (2006). Surf: Speeded up robust features. In *Computer Vision–ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Proceedings, Part I 9* (pp. 404-417). Springer Berlin Heidelberg.
- Brylka, R., Bierwirth, B., & Schwanecke, U. (2021). AI-based recognition of dangerous goods labels and metric package features. In *Adapting to the Future: How Digitalization Shapes Sustainable Logistics and Resilient Supply Chain Management. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 31* (pp. 245-272). Berlin: epubli GmbH.
- Calonder, M., Lepetit, V., Strecha, C., & Fua, P. (2010). Brief: Binary robust independent elementary features. In *Computer Vision–ECCV 2010: 11th European Conference on Computer Vision, Heraklion, Crete, Greece, September 5-11, 2010, Proceedings, Part IV 11* (pp. 778-792). Springer Berlin Heidelberg.
- Dalal, N., & Triggs, B. (2005, June). Histograms of oriented gradients for human detection. In *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05) (Vol. 1, pp. 886-893)*. IEEE.
- Ellena, L. M., Olampi, S., & Guarnieri, F. (2004). Technological risks management: Automatic detection and identification of hazardous material transportation trucks. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 77.
- Fingas, M. F. (2002). *The handbook of hazardous materials spills technology* (pp. 35-1). McGraw-Hill.

- Forero, M. G., Mambuscay, C. L., Monroy, M. F., Miranda, S. L., Méndez, D., Valencia, M. O., & Gomez Selvaraj, M. (2021). Comparative analysis of detectors and feature descriptors for multispectral image matching in rice crops. *Plants*, 10(9), 1791.
- Harris, C., & Stephens, M. (1988, August). A combined corner and edge detector. In *Alvey Vision Conference* (Vol. 15, No. 50, pp. 10-5244).
- Ihmeida, M., & Wei, H. (2021, December). Image registration techniques and applications: Comparative study on remote sensing imagery. In *2021 14th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)* (pp. 142-148). IEEE.
- Kamel, M. M., Hussein, S. I., Salama, G. I., & Elhalwagy, Y. Z. (2020, July). Efficient Target Detection Technique Using Image Matching Via Hybrid Feature Descriptors. In *2020 12th International Conference on Electrical Engineering (ICEENG)* (pp. 102-107). IEEE.
- Kortli, Y., Jridi, M., Al Falou, A., & Atri, M. (2018). A comparative study of CFs, LBP, HOG, SIFT, SURF, and BRIEF for security and face recognition. In *Advanced Secure Optical Image Processing for Communications* (pp. 13-1). Bristol, UK: IOP Publishing.
- Leutenegger, S., Chli, M., & Siegwart, R. Y. (2011, November). BRISK: Binary robust invariant scalable keypoints. In *2011 International Conference on Computer Vision* (pp. 2548-2555). IEEE.
- Lowe, D. G. (1999, September). Object recognition from local scale-invariant features. In *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision* (Vol. 2, pp. 1150-1157). IEEE.
- Lu, X., Ruan, C., Li, R., Xie, T., & Xu, H. (2019, July). Comparative study on safe storage of dangerous goods containers in port areas. In *2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)* (pp. 608-610). IEEE.
- Mohamed, M. A., Tünnermann, J., & Mertsching, B. (2018, August). Seeing Signs of Danger: Attention-Accelerated Hazmat Label Detection. In *2018 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (pp. 1-6). IEEE.
- National Academies of Sciences Transportation Research Board and National Research Council. (2010). *Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Washington, DC: The National Academies Press.

- Oad, A., Kumari, K., Hussain, I., Dong, F., Hammad, B., & Oad, R. (2022). Performance comparison of ORB, SURF and SIFT using Intracranial Haemorrhage CTScan Brain images. *International Journal of Artificial Intelligence & Mathematical Sciences*, 1(2), 26-34.
- Ojala, T., Pietikäinen, M., & Mäenpää, T. (2001). A generalized local binary pattern operator for multiresolution gray scale and rotation invariant texture classification. In *Advances in Pattern Recognition—ICAPR 2001: Second International Conference Rio de Janeiro, Brazil, March 11–14, 2001 Proceedings 2* (pp. 399-408). Springer Berlin Heidelberg.
- OpenCV. (2024a). AKAZE local features matching. Retrieved May 17, 2024, from https://docs.opencv.org/3.4/db/d70/tutorial_akaze_matching.html
- OpenCV. (2024b). Basics of Brute-Force Matcher. Retrieved May 17, 2024, from https://docs.opencv.org/4.x/dc/dc3/tutorial_py_matcher.html
- Rosten, E., & Drummond, T. (2006). Machine learning for high-speed corner detection. In *Computer Vision—ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Graz, Austria, May 7-13, 2006. Proceedings, Part I 9* (pp. 430-443). Springer Berlin Heidelberg.
- Rublee, E., Rabaud, V., Konolige, K., & Bradski, G. (2011, November). ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In *2011 International Conference on Computer Vision* (pp. 2564-2571). IEEE.
- Sharifi, A., Zibaei, A., & Rezaei, M. (2021). A deep learning based hazardous materials (HAZ-MAT) sign detection robot with restricted computational resources. *Machine Learning with Applications*, 6, 100104.
- Shi, J., & Tomasi, C. (1994, June). Good features to track. In *1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 593-600). IEEE.
- Tareen, S. A. K., & Raza, R. H. (2023, March). Potential of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, BRISK, AGAST, and 7 More Algorithms for Matching Extremely Variant Image Pairs. In *2023 4th International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (pp. 1-6). IEEE.
- Tareen, S. A. K., & Saleem, Z. (2018, March). A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. In *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (pp. 1-10). IEEE.
- UNECE. (2024). UN Recommendations on the Transport of Dangerous Goods - Model Regulations Nature, Purpose and Significance of the Recommendations. Retrieved May 17, 2024, from <https://unece.org/about-recommendations>

- U.S. Department of Transportation Federal Motor Carrier Safety Administration. (2022). How to Comply with Federal Hazardous Materials Regulations. Retrieved May 17, 2024, from <https://www.fmcsa.dot.gov/regulations/hazardous-materials/how-comply-federal-hazardous-materials-regulations>
- U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. (2022). U.S. Department of Transportation Announces Over \$32 Million in Grants to Support Local Hazardous Materials Safety Efforts. Retrieved May 17, 2024, from <https://www.phmsa.dot.gov/news/us-department-transportation-announces-over-32-million-grants-support-local-hazardous>
- U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. (2004). Guide for Preparing Hazardous Materials Incidents Reports.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2024). Learn the Basics of Hazardous Waste. Retrieved May 17, 2024, from <https://www.epa.gov/hw/learn-basics-hazardous-waste>
- Watcharejyothin, M., Nishimura, K., & Marinov, M. (2022). Challenges of dangerous goods transport by rail in Thailand. *Sustainable Rail Transport 4: Innovate Rail Research and Educa-tion*, 325-339.



Araştırma Makalesi / Research Article

SİBER GÜVENLİK ALANINDA NİTELİKLİ İŞ GÜCÜ YETİŞTİRMEK İÇİN
BAYRAĞI YAKALA YARIŞMASI YAKLAŞIMI*

CAPTURE THE FLAG COMPETITION APPROACH TO EDUCATE QUALIFIED
WORKFORCE IN CYBER SECURITY

Cafer ULUÇ¹

Can EYÜPOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1529412>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
cafer@tutanota.com

Geliş Tarihi
(Received)
06.08.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
13.09.2024

Kabul Tarihi
(Accepted)
18.09.2024

Öz

Kara, deniz, hava ve uzay, savaşın dört boyutu olarak kabul edilir. Görece yakın sayılacak bir dönemde harbin beşinci boyutu olarak kabul edilen siber uzay, kendisinden önce anılan dört boyutu da etkileme kapasitesine sahiptir. Günümüz çatışmalarının ve dahi savaşların etkili bir aktörü olan bu sahadaki etkin duruşun sağlanması ise kuşkusuz nitelikli insan gücünün varlığıyla olasıdır. Siber güvenlik gibi disiplinler arası bir bünyesinde barındıran bir alanda profesyonel düzeyde uzman yetiştirimin zorluğu bilinmektedir. Siber güvenliğin eğitim yaklaşımında ise alanın dinamiklerine uygun bir metodoloji ortaya konması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu araştırmanın sonucunda varılan noktada ulusal güvenliğin yeni bir unsuru olan siber uzaya devletlerin kamu ve ordu düzeyinde verdiği önceliklerle siber güvenlik eğitiminin aynı zamanda bir devlet politikası olduğu görülmüştür. Bu noktada siber güvenlikte nitelikli iş gücünün yetiştirilmesine yönelik yaklaşımların dünyada ve Türkiye'deki yerini araştırmanın yanı sıra bir eğitim önermesine de bu çalışmada yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Siber güvenlik eğitimi, siber güvenlikte iş gücü, bayrağı yakala yarışması, ulusal güvenlik.

Abstract

The four dimensions of war are land, sea, air and space. In a relatively recent period, the fifth dimension of warfare, cyber space, has been accepted as a fifth dimension of warfare. This has the capacity to affect the four dimensions mentioned before it. It is possible to ensure an effective stance in this field, which is an effective actor in today's conflicts and even wars, with the presence of qualified manpower. It is widely acknowledged that it is challenging to train experts at a professional level in an interdisciplinary field such as cyber security. In the context of cyber security education, it is essential to develop a methodology that aligns with the dynamic nature of the field. This research has revealed that cyber security education is also a state policy, with the priorities set by the states regarding cyber space, which is a novel element of national security at both the public and military levels. In addition to investigating the place of approaches to the training of a qualified labour force in cyber security in the world and in Turkey, this study also includes an educational proposal.

Keywords: Cyber security education, workforce in cyber security, capture the flag, national security.

* Bu yayın Cafer ULUÇ isimli öğrencinin Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Siber Güvenlik Programındaki Yüksek Lisans projesinden üretilmiştir.

¹ Teknopark İstanbul, İstanbul, Türkiye.

Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği ABD, İstanbul, Türkiye.

cafer@tutanota.com, [Orcid.org/0000-0003-4756-5757](https://orcid.org/0000-0003-4756-5757).

² Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

ceyupoglu@hho.msu.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-6133-8617](https://orcid.org/0000-0002-6133-8617).

1. GİRİŞ

Siber güvenlik alanı, ülkelerin en üst düzeyde varlıklarını etkin ve güçlü olarak göstermek durumunda oldukları dijital bir sahadır. Bu yeni alan kara, deniz, hava ve uzay kadar ulusal güvenliğin sağlanmasıyla doğrudan ilgilidir.

Türkiye’de siber güvenlik çerçevesinde ilk strateji belgesi 2013’te T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığınca yayınlanmıştır. “Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve 2013-2014 Eylem Planı” (T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, 2013) sonucunda siber güvenlikle ilgili kamu kurumlarının kurulmasına karar verilmiştir. Yanı sıra 2015’te, Birleşik Krallık’ta yayınlanan “Ulusal Güvenlik Stratejisi ve Stratejik Savunma ve Güvenlik İncelemesi” (Government of the United Kingdom, 2015) adlı belgede siber tehditler, “Birinci Kademe Risk” olarak derecelendirilmiştir (Haggman, 2019). 2016 yılında ABD’de yayınlanan “Siber Güvenlik Ulusal Eylem Planı”nda (Ford ve ark., 2017) siber güvenlik, ABD’nin karşı karşıya olduğu en önemli zorluklardan biri olarak ifade edilmektedir.

Ulusal ve uluslararası literatür çalışması sonucunda güvenlik paradigmasının bütününe etkileyen bir konumda olan siber uzayda görevlendirilecek nitelikli iş gücüne yönelik ciddi çalışmalar olduğu görülmekle birlikte alanın görece yeni olması ise siber güvenlik alanında yetiştirilecek nitelikli iş gücünün eğitim ve öğretimine yönelik yaklaşımların henüz gidecek çok yolun olduğu görülmektedir.

Bu çalışma, dünyada ve Türkiye’de siber güvenlik alanında nitelikli iş gücü yetiştirme yaklaşımlarını incelenmektedir. Yapılan incelemelerin yanı sıra bir eğitim modeli önerisinde bulunmaktadır. Söz konusu yaklaşım ise terimsel olarak Capture the Flag (CTF) adıyla bilinen Bayrağı Yakala Yarışması’dır (BYY). Farklı kıtalardan farklı ülkelerin akademik ölçekteki çalışmaları incelenmiş olup dünyanın farklı coğrafyalarındaki siber güvenlikte uzman yetiştirme perspektifine bir bakış ortaya konması amaçlanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde BYY hakkında genel bilgiler ortaya konacaktır. BYY’nin tarihsel geçmişi, kazanımları ve Türkiye’de düzenlenen “Liseler Arası Bayrağı Yakala Yarışmaları”na değinilecektir.

2.1. Bayrağı Yakala Yarışması

Capture the Flag’in bir kısaltması olan CTF, Türkçede “Bayrağı Yakala”, “Bayrak Kapmaca” ve “Bayrağı Yakala Yarışması” gibi karşılıklarla anılır. Türkçe literatürde ve sahada yaygın olarak CTF olarak bilinir. Bununla birlikte Türkçe kısaltmasının işlevlik kazanması önemlidir. Bu bağlamda çalışma boyunca BYY kısaltmasının kullanımı tercih edilecektir.

Genel bir açıklamayla BYY, siber güvenlik alanındaki yetkin kişilerin, kurgulanmış senaryolardaki soruları çözerek becerilerini gösterebildiği bir tür teknik yarışmadır. Mücadeleye dayalı olarak süren BYY’ler aynı zamanda kişiye farklı bakış açıları

kazandıran yönü de içinde barındırır. Katılımcı, soruları çözdüğünü kanıtlamak adına sorunun içerisinde yer alan metin tabanlı ifadeye ulaşarak ilgili bölüme bunu ekler ve böylece bayrağı yakalamış/kapmış olur.

Her bayrak, sorunun zorluk düzeyine göre değişken bir puanlamaya sahiptir. Yarışmacı tek başına olabileceği gibi takım halinde de katılarak yarışabilirler. Belli bir sürenin sonunda yarışma biter ve en çok puanı toplayan kişi ya da takımlara organizasyonu düzenleyenlerce belirlenen ödüller verilir.

Bayrağı yakala yarışmalarının kendi içinde bir bayram biçimi bulunmaktadır. Genel bir bayrak biçimi ise şöyledir: *flag{Düz_Metin}*. “flag” sözcüğü, BYY’yi düzenleyenlere göre değişebilmektedir.

Bayrağı yakala terimi, fiziksel olarak iki takım arasında oynana açık hava oyununda kullanılır. Amaç, karşı rakibin bayrağını (gizlenmiş de olabilir) ele geçirirken aynı zamanda kendi bayrağını da karşı takımdan korumayı içerir.

1993 yılında ilk defa DEFCON’da düzenlenen yarışmada bu terim siber uzaya taşınmış oldu (Švábenský ve ark., 2020). DEFCON başladığında bir grup siber güvenlik uzmanının ilgisi dahilindeydi. Çok geçmeden özel sektörün ve kolluk güçlerinin de ilgisini çekmeye başladı (Katzcy Consulting, 2016).

Aradan geçen otuz yıldan sonra hacking temalı konferanslar ve BYY’ler yalnızca uzmanları değil yeni başlayan kişiler için de bir giriş kapısı olma niteliği taşıyabilmektedir. Özellikle oyunlaştırma yaklaşımları dünya çapındaki öğretmenlerin eğitim müfredatında elini güçlendiren bir yöntem olarak işlevsellik göstermektedir (Švábenský ve ark., 2020).

Chung ve Cohen (Chung & Cohen, 2014) çalışmalarında BYY’yi satranca benzetmektedirler. Yazarlar, kuralların basit olduğunu ancak ustalaşmanın uzun yıllara dayanan bir deneyim gerektirdiğine dikkat çekmektedir.

2.1.1. Kazanımları

Siber güvenlikte nitelikli personel açığını kapatmada siber güvenlik yarışmaları tek başına yeterli olmayabilir. Bu kabulde birlikte yarışmaya katılanlar özenle hazırlanmış simülasyonlarda gerçek dünya sorunlarına benzer olarak uygulamalı deneyimleri edinebilmektedirler (Katzcy Consulting, 2016). BYY’ler, okul temelinde ele alındığında sınıf içinde ya da ders kitaplarındaki teorik konuların pratiğe dökülmesine zemin hazırlar. Normal şartlarda riskli olabilecek saldırı ve savunma durumlarını güvenli bir sanallaştırma ortamında sinamalarına olanak tanınır. Böylece katılımcılar, tutuklanma ve yargılanma gibi herhangi bir yasal endişe duymaksızın saldırıları gerçekleştirebilirler (Davis ve ark., 2014). Pedagojik açıdan değeri son zamanlarda daha fazla öne çıkan BYY’ler, katılımcılarına uygulamalı güvenlik becerilerini deneyimleme şansı sağlar (Wi ve ark., 2018). Buradan hareketle bir öğretim aracı olarak BYY, öğrencinin performansına yönelik anlık geri bildirimler sunarak artı ve eksi yönlerin ortaya konmasında öğrenciye yol gösterebilir. Öğrencinin derste gördüğü konuları gerçek hayatla bir bağ kurabilmesi önemli bir ayrıntıdır (Leune & Petrilli, 2017). BYY’ler, uygulama alanı sunabilen bir formata sahip olduğundan öğrenciye

teoride gördüğü konuları pratikte uygulayabileceği bir ortam sunabilmektedirler. Gardner'ın "Çoklu Zeka Kuramı"nda ortaya koyduğu üzere her kişinin zeka türü çeşitlilik gösterebilmektedir. BYY'ler bu çoklu sunum yönüyle öğrenime yüksek katkı sağlayabilmektedirler.

BYY'ler, katılımcısına bilişim sistemlerine yapılan saldırı vektörlerini tanıma noktasında katkı sağlayabilmektedirler. Bununla birlikte BYY'ler katılımcısına, ilgili sistemlerin nasıl savunulabileceğine yönelik etkili bir bakış kazandırabilmektedirler.

BYY'ler, geleceğin siber güvenlik profesyonellerini ve liderlerini hazırlamasında önemli bir katkıları vardır (Albert & Wallingford, 2010). BYY'de başarı gösteren öğrencilere burs, staj ve iş fırsatları sunulmaktadır (Cherinka & Prezzama, 2015; Conti ve ark., 2011; Davis ve ark., 2014; Raman ve ark., 2014). Geleceğin iş gücüne katkı sağlamak için BYY'leri bir araç olarak değerlendirirken aynı zamanda mevcuttaki siber güvenlik uzmanlarının güncel kalması ve yeteneklerini yükseltme olanağı da tanınmaktadır (Katzcy Consulting, 2016). BYY'ler kurum, kuruluş ve şirketler için yetenekli kişilerin işe alımı için iş verenlere uygun ortamlar sunmaktadır (Matias ve ark., 2018). BYY'lere katılım ve elde edilen başarılar, iş verenin işe alım sürecinde kişinin teknik becerileri hakkında temel bir görüş sağlar (Chung, Lowering the Barriers to Capture The Flag Administration and Participation, 2017). Bu yönüyle de bayrağı yakala yarışmalarına katılmak, kişinin saygınlığına da katkı sağlar (Conti ve ark., 2011).

BYY'ler iş verenlerin potansiyel olarak istihdam edecekleri iş gücüyle buluşmaları için bir tür alan da sağlayabilmektedir. Buna bir örnek olarak 2009 yılında ABD'de düzenlenen Ulusal Üniversite Siber Savunma Yarışması'nda Boeing firmasının BYY'de başarılı olanlara iş teklif etmesi verilebilir (Katzcy Consulting, 2016). Türkiye'de de benzer durumların yaşandığı bilinmektedir (Ünal, "Siber Yıldız" Olmak için 26 Bin Kişi Yarışacak, 2017).

Capture the Flag altyapısı sunan CTFd ekibinden Kevin Chung'ın da (Chung, Lowering the Barriers to Capture The Flag Administration and Participation, 2017) vurguladığı üzere BYY'ler, rekabetçi yönleri ve ekip halinde yarışma olanağı sunduklarından bilgi güvenliği sektörüne giriş olarak kabul edilir. Bayrağı yakala yarışmalarının ve buna yönelik platformların artmasıyla siber güvenlik alanına giriş engeli azalacaktır.

BYY'ler, yetkin kişilerin aralarında yarıştığı ve bir tür gövde gösterisi yapıldığı eğlenceli ciddi oyunlardır. Katılımcılara farklı bakış açıları kazandıran bu tür yarışmaların yeni başlayanlar için de siber güvenliği bir giriş kapısı olacağı düşünüldükçe öne sürülen bu çalışma, siber güvenlik öğretiminde BYY'nin büyük bir potansiyele sahip olunduğu fikriyle ele alınmaktadır.

BYY'ler aynı zamanda ekip içi yönetim ve iş birliği gibi yeteneklerin de gelişimine katkı sağlayabilmektedir. Yanı sıra BYY'ler, *bir hacker nasıl düşünür*, bunu anlamak üzerine zihinsel bir beceri gelişimine zemin hazırlar, dahası, katkı sağlayarak bir bakış açısı kazandırır. Analiz kabiliyetine katkı sağlayan bu süreçte noktaları birleştirici bir perspektifle potansiyel olarak saldırganın düşünce yapısıyla konuya yaklaşım gösterebilir (Chase & Uppuluri, 2022; Eagle & Clark, 2004; Katsantonis ve ark., 2023; Katzcy Consulting, 2016; Li & Kulkarni, 2016; Rowe ve ark., 2011; Son ve ark., 2012;

Yasin ve ark, 2018). “Hacker bakış açısını edinmek” öylesine bir söylem değildir. Nitekim kötü niyetli bir saldırganın konuya olan yaklaşımını tanımak, gelebilecek olası saldırı vektörlerini kestirebilmenin etkili bir yoludur. Sivil güvenlik araştırmacılarının yanı sıra askeri akademideki araştırmacıların (Conti ve ark., 2011) da dikkat çektiği nokta budur.

Çin’de yerleşik Tsinghua Üniversitesinden (清华大学) Affan ve ark. (Yasin ve ark., 2018) 2018’de ele aldıkları çalışmada, oyuncuların bir saldırgan gibi düşüncelerini sağlayacak oyunlaştırılmış bir eğitim önermektedirler. Burada *hacker* ifadesini hangi amaçla kullanıldığına açıklık getirmekte yarar görülmektedir. Yaygın kanının aksine *hacker*, sistemleri bozan ve yıkıcı faaliyetleri gerçekleştiren kişi değil bilişim sistemlerini derinlemesine bilen, farklı bakış açılarıyla ortaya ürün/hizmet koyabilen üst düzey kabiliyete sahip bilgisayar uzmanıdır.

BYY’ye katılmanın öğrenci üzerindeki yararlarını sıralarken son olarak benzer ilgiye ve yönlere sahip kişilerin bir araya gelmesine olanak tanınmasına değinmek gerekmektedir. Bir tür sosyal etkinlik olarak da görülebilecek olan BYY’ler, bu yönüyle katılımcısına bir tanışma ağı da sağlamaktadırlar (Eagle & Clark, 2004).

2.1.2. BYY platformları

Siber güvenliğe yeni başlayanların öğrendiklerini uygulayabileceği alanlar siber güvenliğin doğası gereği istenmeyen yasa dışı sonuçlara neden olabilmektedir. Konuyla ilgili halihazırda var olan laboratuvar ortamları ise özellikle siber güvenlik temelleri olmayan ya da yeni başlayan öğrencilerin gözünde büyüebilmekte, heveslerinin kırılmasına neden olabilmektedir.

Var olan BYY’ler değerli bir çözüm olmalarının yanı sıra yeni başlayan bir öğrenci açısından yaklaşıldığında öğretim materyali olarak görülmeğe uzaklardır. Ayrıca yaygın olarak bilinen bu platformlarda ücretsiz olarak sunulanlar olsa da ağırlıklı olarak ücretlidir ve ek masraflar içerir. Bu dönem projesinde ortaya koyulan amaç doğrultusunda öğretim temelli başlıca bir BYY platformu geliştirilmesi önceliklidir.

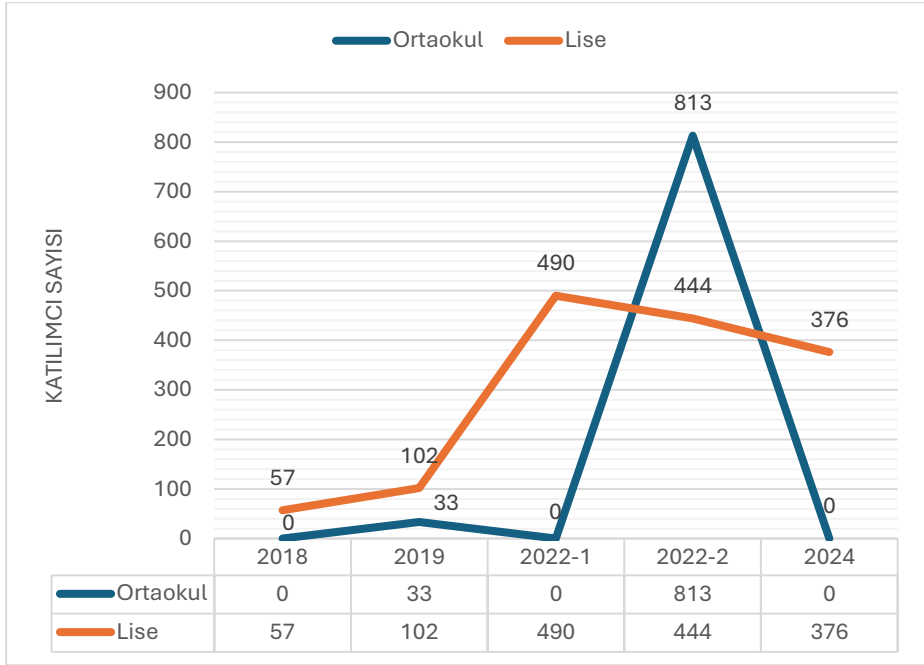
2.1.3. Liseler arası bayrağı yakala yarışması

20 Ocak 2017’de Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK) bünyesindeki Ulusal Siber Olaylara Müdahale Merkezinin (USOM) “Siber Yıldız” adıyla düzenlediği BYY’ye yaklaşık 26.000 kişi başvuru yapmıştır. Bu başvurular incelendiğinde %84’ünün 18 yaş altında, %16’sının ise 13-14 yaş altında olduğu sonucuna varılmaktadır (Ünal, 2017). Bu verilerden hareketle bu projenin de odak kitlesi olarak belirlendiği ilköğretim ve ortaöğretim öğrencilerinin ilgisinin ne denli olduğu açıkça görülebilmektedir.

Türkiye’de ortaöğretim düzeyinde siber güvenlik çalışmaları 2015’e değin gitmektedir. 2015-2016 eğitim ve öğretim yılında “LAB3: Liseler Arası Bilişim Kampı” adıyla başlatılan proje 2017’de İstanbul İl Milli Eğitim Müdürlüğünce siber güvenlik müfredatı ve siber güvenlik lisesi çalışmalarına evrilmiştir (Küçükçekmece İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü, 2016) (Uluç, 2017). 15 Mayıs 2020 yılında ise bütünüyle siber

güvenlik eğitimi üzerine faaliyet göstermesi amacıyla Teknopark İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi (2023) kurulmuştur.

Şekil 1’de “Liseler Arası Bayrağı Yakala Yarışmaları”na başvuran öğrencilerin sayıları yer almaktadır. 2018 ve 2019’daki yarışmalar İstanbul İl Milli Eğitim Müdürlüğü bünyesinde düzenlenmiştir. 2020’de Teknopark İstanbul MTAL kurulup eğitim ve öğretime başladıktan sonra söz konusu yarışma TİMTAL’in ana sorumluluğunda düzenlenmeye başlanmıştır.



Şekil 1. Yıllara göre Liseler Arası Bayrağı Yakala Yarışmalarına Başvuran Öğrenci Sayısı

Ortaokul öğrencilerinin 0 (sıfır) olarak görüldüğü 2018 ve 2022-1 yıllarında yarışma yalnızca liselere yönelik düzenlenmiştir. Küresel salgın Covid-19 nedeniyle 2020 ve 2021 yıllarında yarışma düzenlenememiştir. İlk üç yıldaki yarışmalar, İstanbul’daki okulların katılımıyla sınırlıdır. 2022-2’deki yarışma ise Türkiye genelindeki ortaokul ve lise öğrencilerinin katılımıyla çevrim içi olarak gerçekleştirilmiştir.

Savunma Sanayii Başkanlığı (SSB) ve Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı (DDO) koordinasyonunda Türkiye Siber Güvenlik Kümelenmesi tarafından “Siber Güvenlik Haftası” düzenlenmektedir. Hafta kapsamında, Teknopark İstanbul MTAL’nin hazırladığı ve 28-29 Kasım 2022’de çevrim içi düzenlenen BYY’lerde bireysel olarak 813 ortaokul, 444 lise olmak üzere 1.257 öğrenci bayrağı yakalamak için akranlarıyla yarışmıştır. 2024 yılında ise Cumhuriyetimizin ikinci 100 yılına özel olarak tüm Türkiye’den liselerin katılımına açık olarak düzenlenmiştir. “Cumhuriyetimizin İkinci 100 Yılında Bayrak Sende Türkiye” deyişiyle 25 Mayıs 2024’te ulusal ölçekte

gerçekleşen “5. Liseler Arası Ulusal Bayrağı Yakala Yarışması”na 46 farklı ilden 376 lise öğrencisi başvuru yapmıştır.

2.2. Ulusal Güvenlik Bağlamında Siber Uzak

Yeni teknolojilerin ülkelerin stratejik hedeflerinde yer almasıyla birlikte ordunun da saldırı ve savunma sistemleriyle entegrasyonu yerleşmeye başladı ve böylece askeri anlamda savaşın sahası da genişlemiş oldu. Örneğin hava sahası, I. ve II. Dünya Savaşları’nda kara ve denizin yanı sıra yeni savaş alanı olarak varlık gösterdi. Soğuk Savaş’ın ardından ise uzak, Batı ve Doğu blokları arasında yeni nesil bir savaş alanı olarak görüldü. Takip eden süreçte elektronik bileşenlerin gelişimiyle birlikte bilgisayar ve İnternet’in git gide askeri ve sivilde yer edinmesiyle dijital varlıklar da ulusal güvenliğin bir parçası haline geldi. Bu gelişmeler doğrultusunda siber uzak; günümüzde kara, deniz, hava, uzaya ek olarak beşinci savaş alanı olarak değerlendirilmekte, her fırsatta güçlü bir vurguyla kendine yer bulabilmektedir (Dill, 2018).

Siber güvenliği yalnızca teknik bir disiplin olarak görmek bu noktadaki yaklaşımlarda eksikliklere neden olmaktadır. Konvansiyonel bir savaşta sahadaki askeri gücün varlığının yanı sıra cephe gerisindeki halkın duruşu da belirleyici bir unsurdur. Yanı sıra psikoloji, sosyoloji, ekonomi, bürokrasi ve diplomasi gibi faktörler de en az ordunun kapasitesi kadar etkili olabilmektedir. Dolayısıyla güvenlik, bütüncül bir bakışla konuya yaklaşımı gerekli kılmaktadır.

Güvenlik paradigmasının dönüşümü, güvenliğin yalnızca ordunun ve kolluk güçlerinin geleneksel anlamda sorumluluk alanının dışında bir yaklaşımı zorunlu kıldığı bir dönemde, siber güvenlik de proaktif bir yaklaşımla sivil unsurları da sürece dahil etmektedir. MİT’in 2024’te yayınladığı “2023 Yılı Faaliyet Raporu”nda (Milli İstihbarat Teşkilatı, 2024) dikkat çekildiği üzere bölgesel ve küresel ölçekteki tehditlerin hibrit ve asimetrik boyut kazanması ulusal güvenliğin sağlanmasını giderek daha karmaşık biçime getirmektedir. Bu durumda geleneksel güvenlik anlayışlarının yetersiz kaldığı ve çağa uygun yaklaşımların uygulanmasına vurgu yapılmaktadır. Teşkilat, ilgili raporda siber güvenliğe ayrıca değinerek kurumun siber kapasitesinin güçlendirilerek yeni nesil teknolojik atılımlarla Siber Vatan’da da etkin varlık gösterildiğine işaret etmektedir.

Siber uzayın yapısı dijital olduğundan konvansiyonel harp unsurlarını görmek olası değildir. Bundan dolayı devlet ve devlet dışı aktörlerin siber gücüyle ilgili bir çıkarımda bulunmak isabetli olamamaktadır. Askeri doktrinleriyle saygınlık kazanan Prusyalı General Clausewitz’in şu sözü konuyu destekler niteliktedir: “*Tüm insan faaliyetleri açısından savaş, en çok bir kart oyununa benzer.*”.

Siber güvenlik, yapısının yanı sıra doğrudan devlet ve devlet dışı aktörlerin sistemlerine dahi etki edebilecek düzeyde bir konumda olduğundan söz konusu unsurların korunmasına yönelik aksiyonlar karmaşıklık içerir. Bu noktada öğretici faaliyetlerde eğitim amaçlı içeriklerin öğrenciye aktarılmasında zorluklar yaşanması şaşırtıcı bir sonuç değildir. Temel amaç siber güvenlik teknolojilerinin ve güvenlik paradigmasının öğrencide durumsal farkındalığını oluşturmak ve bir bakış açısı kazandırmak olmaktadır.

2007'deki Rusya'nın Estonya'ya düzenlediği siber saldırılar sonucu NATO'nun başkent Tallinn'e kurduğu ve Türkiye'nin de daimi bir temsilcisinin yer aldığı NATO Müşterek Siber Savunma Mükemmeliyet Merkezi (CCDCOE) ise Estonya'ya siber güvenlik tatbikatlarının merkez üssü konumuna getirmiştir.

Siber güvenliğin sağlanması, siber uzayın yapısı gereği yalnızca güvenlik güçlerinin üstlenebileceği bir çerçeve dışındadır. Kolluk güçlerinin yanı sıra akademi, sektör ve her bireyin bu noktada koordinasyonu gerekir. Nitekim yıllar geçtikçe tehdit düzeyi artarken zarar verici unsurları gerçekleştirmek için gereken teknik becerilerde yetkinliğin ölçüsü azalmaktadır. Dolayısıyla tehdidin nereden geleceği (devlet ya da devlet dışı) bilinmeyen bir yapı söz konusudur.

Günümüzde, dünyanın her tarafında ve her an siber saldırılar yaşanmaktadır. Her yıl artan boyutta ilerleyen bu saldırılara karşı koymak ve verilerin güvenliğini sağlamak isteyen kurum ve kuruluşlar için zorluklar da artmaktadır. Bu zorluklara karşı güvenlik ve bilişim teknolojileri personellerinin eğitilmesi gerekmektedir (Noor Azam & Beuran, 2018). 2011 yılında ABD'de gerçekleştirilen bir konferansta, akademik kurumların siber tehditlere karşı yetenekli öğrencilerin yetiştirilmesi, ABD ve müttefiklerinin egemenliğinin korunmasına yardımcı olacak biçimde kritik bir konumda değerlendirilmektedir. ABD, ülkesine yapılacak siber saldırıları bir savaş eylemi olarak değerlendirirken Birleşik Krallık'ın, gelişmiş bir askeri siber güvenlik kapasitesi için 2011 yılında 1 milyar dolarlık bir yatırım yaptığı belirtilmektedir (Rowe ve ark., 2011). Maurice ve ark. (Hendrix ve ark., 2016) makalelerinde belirttikleri üzere 2016 yılı için Birleşik Krallık Kabine Ofisinin verisine göre siber suçların ülke ekonomisine maliyeti yılda yaklaşık olarak 27 milyar pounddur. Ayrıca yazarlar, Birleşik Krallık'ın siber güvenlik alanındaki işe alımında oyunlaştırmanın kullanıldığına değinmektedirler. Araştırıldığında, bu oyunun Birleşik Krallık devletince desteklendiği (McGoogan, 2015) görülmektedir.

Dünya genelinde milyonu aşan boyutta siber güvenlik uzmanı eksikliğinden söz edilir. Bu derinlik kamu kurumları için daha fazladır çünkü nitelikli uzmanlara özel sektörde çeşitli olanaklarla birlikte yüksek maaşlar verilebilmektedir. Devlet kurumlarında ise standart bir maaş söz konusudur. Birleşik Krallık'taki bir çalışmada (Haggman, 2019) da buna değinilmekte, ordunun ve istihbarat teşkilatlarının bile özel sektördeki cezbedici maaşların kamuda olmayışına dikkat çekilmekte, bunun da nitelikli profesyonellerin kurum içinde istihdam edilememesi nedeniyle bir sorun olduğu vurgulanmaktadır.

Bilişim teknolojilerinin yapısı, onu sürekli gelişen ve dönüşen bir biçimde tutmaktadır. Nitekim böyleleri bir sahada etkin yer almanın yolu da bu dinamizme uygun bir insan kaynağının varlığıyla mümkündür. Bu noktada ABD, özellikle kritik altyapılarının sürekli korunmasını sağlayabilecek nitelikli iş gücüne sahip olmak adına ciddi bir yapılanmaya gittiği görülmektedir. Siber güvenlik alanındaki mesleklere yönelik norm ve standartları oluşturan bir kurumun varlığı ABD'de görülmektedir. Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü (NIST: National Institute of Standards and Technology) bünyesinde kurulan Ulusal Siber Güvenlik Eğitimi Girişimi (NICE: National Initiative for Cybersecurity Education) bulunmaktadır (Cusak, 2023). NICE devlet, akademi ve özel sektöre arasında bir iş birliği sağlayarak siber güvenlik eğitimi ve iş gücünün gelişimine odaklanan bir ortaklıktır (Katzcy Consulting, 2016).

Düzenlenen NICE konferanslarının temaları ise iş gücünü geliştirmek için paydaşların bir arada ortak çalışmalar yürütmesine olanak tanımak, bilimsel çalışmalar ortaya koymaktır. Bu çalışmanın ele alındığı 2024 yılı içerisinde bakıldığında NICE konferansı, 3-5 Haziran 2024 tarihinde Teksas'ta yapılmıştır. İlgili web sayfasında her yıl olmak üzere 2028 yılına kadar haziran ayı içerisinde gerçekleştirileceğine yönelik takvimin olması, NICE'nin istikrarlı çalışmalarına dikkat çekilmesi açısından önemli bir ayrıntıdır. 2024'te düzenlenecek olan konferansın (National Initiative for Cybersecurity Education, 2024) teması ise “Ekosistemin Güçlendirilmesi” ana başlığında siber güvenlik alanındaki iş gücü açığının giderilmesinde paydaşların bir araya getirilmesidir. Cusak'ın ele aldığı makalede (Cusak, 2023) aktardığı üzere NICE konferanslarında siber güvenlik eğitiminin liseden de önce ortaokul düzeyinde başlanmasına yönelik öneriler söz konusudur. İlgili konferansta gerçekleştirilen panellerin birinde *GenCyber* ve *Cyber Patriot* gibi BYY çalışmalarının basitleştirilerek ortaokul seviyesine çekilmesi ve öğrencilerine eğitime katkı sağlayacak biçimde kullanılması vurgulanmaktadır. Böylece, yeni başlayan ve deneyimsiz öğrenciler göz önüne alınarak başarılı sonuçlara giden yolda başarısız olmalarına izin verilebilecektir.

ABD'deki çalışmalar incelendiğinde üniversiteden önce lise düzeyinde siber güvenlik eğitimlerinin ders içi ve ders dışı etkinliklerle gündemde tutulduğu görülmektedir. Yani sıra ilköğretim ve ortaokul düzeyinde de siber güvenlik çalışmalarının kamu kurumlarının sorumluluk alanına alındığı da söz konusudur. Örneğin, ABD Hava Kuvvetleri, Cyber Patriot programını genişleterek ilköğretim öğrencilerine yönelik farklı konu modülleri hazırlamaktadır (Li & Kulkarni, 2016).

Cyber Patriot, 2009'da sekiz takımla faaliyetine başlamıştır. 2013 yılına ait bir çalışmada, havacılık ve savunma şirketi olan ve ABD ordusuyla iş birliğiyle bilinen Northrop Grumman tarafından 4,5 milyon dolar bağış yapıldığı kaydedilmektedir (Tadjeh, 2013). Northrop Grumman, savunma sanayii şirketlerinin sıralamasını derlemede saygın bir yayın olan Defense News Top 100'de 3. sıradadır. Söz konusu listede (Defense News, 2024) ülkemizden de dört firma (ASELSAN, TUSAŞ, ROKETSAN, ASFAT) bulunmaktadır. Cyber Patriot, 2024 yılında halen faaliyetlerini sürdürmektedir.

ABD'deki askeri kurumlar akademik çalışmaları da finansal olarak desteklemektedirler. Örneğin, 2022 yılında yazılan ve liseler için siber güvenliği konu edinen iki makalede açık olarak şöyle yazılmaktadır: “*Bu araştırma kısmen NSA (National Security Agency: Ulusal Güvenlik Ajansı), NSF (National Science Foundation: Ulusal Bilim Vakfı) ve Cypherpath tarafından finanse edildi.*” (Chase & Uppuluri, 2022). Bir diğer makalede (Werther ve ark., 2011) ise ABD Hava Kuvvetleri tarafından desteklendiği yer almaktadır.

ABD Hava Kuvvetleri görev tanımına “siber uzay savunması” ekleyerek “siber komuta” yapısını oluşturmuştur. AFA, lise öğrencilerinin bilim ve teknoloji alanlarıyla birlikte siber güvenlik alanında çalışmalarına yönelik bir dizi programları düzenlemeye başladığı bilinmektedir. AFA, Teksas Üniversitesindeki Altyapı Güvence ve Güvenlik Merkezi (CIAS: Center for Information Assurance and Security) ve Uluslararası Bilim Uygulamaları Birliği (SAIC: Science Applications International Corporation) kurumlarıyla iş birliği içerisinde doğrudan lise öğrencilerine yönelik “Cyber Patriot” eğitim programını geliştirdiler ve bu programın ilki 2009 yılında gerçekleştirildi (White

ve ark., 2010). Siber güvenlik konusu ABD tarafında ulusal güvenliğin ayrılmaz bir parçası olarak görülmekte ve her uygun fırsatta buna dikkat çekilmektedir. Cyber Patriot'ın adlandırmasının da buna uygun olarak seçildiği görülmektedir. Türkçeye "Siber Vatandaş" olarak çevrilebilmektedir. White ve ark. (2010) ilerleyen yıllarda öğrencilerin hangi kariyer planını seçerlerse seçsinler sonuç olarak Cyber Patriot'ta aldıkları eğitim sonucunda edindikleri becerilerin onlara ve ABD'ye yardımcı olacağını anımsatmaktadırlar.

Te-Shun ve Jones (Chou & Jones, 2018), ABD'nin siber güvenlik eğitimini birinci önceliği olarak belirlediğini ifade etmektedirler. ABD'de yalnızca eğitimle ilgili kamu kurumları değil askeri kurumlar da BYY etkinlikleri düzenlemekte ve diğer yarışmalara sponsor olmaktadır (Cooper & Harris, 2022). ABD Donanma Hava Harp Merkezi Eğitim Sistemleri Bölümünden Cooper ve Harris'in ele aldığı çalışmada (Cooper & Harris, 2022) BYY'nin öğrenimdeki yararlarının kabul edilmesiyle birlikte Savunma Bakanlığına (Department of Defense) bağlı kuruluşlar siber güvenlikteki iş gücünün oluşmasına bu gibi siber güvenlik yarışmalarının geliştirilmesinde de etkin olarak yer aldıklarına dikkat çekmektedir.

Siber güvenlik alanında profesyonel eksikliği birçok çalışmada dile getirilmektedir. Bu sorunu gidermek için yetenekli kişilerin siber güvenlik alanında kariyer hedefine yönlendirmek adına ABD'de birtakım çalışmalar yürütülmektedir (Ster, 2019). Siber güvenlik profesyonellerinin eksikliği 2019'daki bir çalışmada (Ster, 2019) belirtilmiş olup alana yönelik ilginin artırılması adına çalışmalar farklı bölgelerde sürdürülmeye ve çeşitlenmeye devam etmektedir. Oluşan profesyonel boşluğunu doldurmak adına Kaliforniya Siber Güvenlik Enstitüsü, eyalet bazında önemli kuruluşlardan biri olarak anılmaktadır. Enstitü, Kaliforniya Politeknik Eyalet Üniversitesine bağlıdır. Yarışmanın paydaşları arasında ABD'nin istihbarat ve güvenlik güçleri olan Ulusal Güvenlik Ajansı (National Security Agency), Ulusal Muhafız Bürosu (National Guard Bureau) ve Uzay Kuvvetleri (Space Force) bulunmaktadır (California Cybersecurity Institute, 2024).

Cyber Patriot, ABD Hava ve Uzay Kuvvetleri Birliğince yürütülen savunma odaklı bir siber güvenlik yarışmasıdır. Yarışmanın amacı, ABD'nin siber güvenlik iş gücüne yönelik artan ihtiyacı karşılamaktır. AFA, Cyber Patriot ile ulusal çapta lise öğrencilerine yönelik BYY düzenlemek amacıyla faaliyetine başlamıştır (Albert & Wallingford, 2010). 2024 yılı itibarıyla 16. kez düzenlenecek olan Cyber Patriot, "Ulusal Gençlik Siber Eğitim Programı" olarak kendisini tanıtmaktadır. Lise öğrencileri hedefiyle başlayan proje genişleyerek güncelde ortaokul öğrencilerini de kapsamaktadır (Cyber Patriot, 2024). Yanı sıra ilkökul düzeyinde öğretim içerikleri de oluşturmaktadırlar (Cyber Patriot, 2024). Cyber Patriot, İç Güvenlik Bakanlığı (Department of Homeland Security) ve Amerikan Askeri Üniversitesi (American Military University) gibi kamu kurumu ve özel şirketlerin sponsorluğuyla yapılmaktadır. Açıklandığı kadarıyla (Cyber Patriot, 2024) -yapılan bağışlar ve devlet kurumlarının fonlarının dışında- yalnızca 2024'teki organizasyon için sponsorların katkılarıyla 515 bin dolar bütçe ile fonlanmaktadır.

Siber güvenlik her ne kadar teknik bir beceri istese de amacının güvenliği sağlamak olduğu göz ardı edilmemelidir. Nitelikli güvenlik, farklı disiplinlerin bir aradalığıyla sağlanabilir. Bunların en başında iletişim ve yönetim gelir ki güvenliği

sağlanması amaçlanan son kullanıcıya yönelik çözüm sunulabilsin. Saldırı tarafında olan bir siber güvenlik uzmanı nasıl düşünürse savunma tarafında çalışan siber güvenlik uzmanının da bu düşünce yapısına kavuşması gerekir. Bu da teknik ve duygusal empatiyle mümkün olabilmektedir. Yanı sıra geliştirilen sistemler ve günümüzde yapay zekanın etkin biçimde yer almasıyla insan faktörü belli bir ölçüde dışarıda tutulabilmektedir. Siber güvenlik söz konusu olduğunda ifade edilen şu meşhur sözde olduğu gibi *güvenlikte en zayıf halka insandır*. Fakat sistemler her ne kadar gelişirse gelişsin, teknik istihbarat alanında olduğu gibi, insan temelli istihbarat belirleyici ve karar verici noktadadır. Siber güvenlik konusunda da benzer bir yaklaşım yanlış olmayacaktır. Anımsanmalıdır ki bir savaş oyunu, belirli bir stratejiyi ya da aracı test etmekten ötede sağladığı daha önemli bir yönü vardır: O stratejiyi/aracı uygulayacak olan insanı sinamak (Haggman, 2019).

Kanada Siber Güvenlik Merkezi tarafından hazırlanan raporda (Canadian Centre for Cyber Security, 2022) siber tehdit aktörleri ve motivasyonları şöyle açıklanmaktadır:

- Ulus devletlerin siber tehdit aktörleri genellikle jeopolitik motivasyona sahiptir.
- Siber suçlular genellikle finansal motivasyona sahiptir.
- Hacktivistler genellikle ideolojik motivasyona sahiptir.
- Terörist gruplar genellikle ideolojik şiddet motivasyonuna sahiptir.
- Heyecan arayan maceraperestler genellikle tatmin ile motive olurlar.
- İçeriden gelen tehdit aktörleri genellikle hoşnutsuzlukla motive olurlar.

Siber uzayın yapısı gereği savaştan ziyade bir mücadele ortamı olarak tanımlanmasını gerekli kılmaktadır. Literatürde sıklıkla geçtiği üzere *siber savaş* terimi, Milli İstihbarat Teşkilatının hazırladığı “MİT Sözlük”te (Milli İstihbarat Teşkilatı, 2024) şöyle ifade edilmektedir: “Zarar vermek, manipüle etmek, kendi çıkarları çerçevesinde kullanmak, kesinti yaratmak, tamamen hizmet veremez duruma getirmek üzere gerçekleştirilen saldırı faaliyetlerinin tümü”. Clarke’a göre (LeClair, Abraham, & Shih, 2013) ise siber savaş, bir devletin başka bir ülkenin bilgisayarlarına ya da ağlarına zarar vermek veya kesintiye neden olmak amacıyla sızma eylemleridir. 2007’de Rusya tarafından Estonya’ya ve ABD-İsrail tarafından İran’a düzenlenen siber ataklar bir ülkenin başka bir ülkenin kritik altyapılarına yönelik düzenlediği etki düzeyi yüksek saldırılar olarak örnek verilebilir. 2010 yılında dönemin ABD Başkanı Obama, ülkesinin dijital altyapılarını “stratejik ulusal varlık” olarak ilan etmiş olması (The Economist, 2010), alana yönelik verilen kritik hassasiyeti ortaya koyması açısından önemlidir.

ABD ordusundan Yarbay Karen J. Dill’in ele aldığı bir çalışmada (Dill, 2018) siber uzayın askeri yönüne dikkat çekilmektedir. ABD Başkanı tarafından Savunma Bakanlığına ve ilgili kamu kuruluşlarına siber güvenlik profesyonellerinin eğitimi ve işte tutulması konusunda uzun vadeli bir yol belirleme talimatı verildiğine vurgu yapılmaktadır. ABD’de yürütülen bir doktora tezinde (Wagner, 2023) siber güvenlik alanındaki uzman eksikliğinin ulusal güvenliği riske atacak durumda olduğu ifade edilmektedir. ABD, ulusal hedeflerini korumak adına siber uzaydaki yeteneklerini güçlendirmek adına sivil ve ordu kurumlarıyla siber güvenlikte nitelikli iş gücü için yetenek havuzunu güncel tutmaya çalışmaktadır (Dill, 2018). Siber güvenlik alanında nitelikli uzman açığı birçok çalışmada yinelenmektedir. Bu açığı kapatmaya yardımcı

olmak için ABD Hava Kuvvetleri Birliği, siber güvenlik alanında çalışan vasıflı bireylerin sayısını artırmak amacıyla 2008 yılında Cyber Patriot (Manson ve ark., 2012) yarışmasını tasarladı ki daha öncesinde söz konusu yarışma üzerine ayrıntılı bilgiye önceki sayfalarda değinilmişti.

Siber güvenlikte etkin bir konumda olmak, konuyla ilgili uluslararası niteliklerde gerek akademik gerek teknik çalışmalarla mümkün olmaktadır. Konu kapsamında bir örnek olarak 2004'te ABD tarafından kararlaştırılan ekim ayı kapsamında "Siber Güvenlik Farkındalık Ayı" (Cybersecurity and Infrastructure Security Agency, 2024) çeşitli etkinliklerle gündeme gelmektedir. Siber güvenlik çalışmalarında ABD ordusunun ve güvenlik birimlerinin öncülüğünde ilerlemektedir. Bu durum şaşırtıcı değildir nitekim hem bilgisayarın hem de İnternet'in çıkışı askeri amaçlar doğrultusunda ortaya konmuştur.

ABD Donanma Yüksek Okulunun bir girişimi olan *CyberCIEGE*, siber güvenlik eğitimi için hazırlanan bir video oyunudur. Yanı sıra Avrupa ülkelerinin bölgesel olarak iş birlikleri içerisinde siber güvenlik eğitiminde güç birliği sağlamaktadırlar. COLTRANE adındaki proje, Erasmus+ programı kapsamında beş ülkenin (Avusturya, Finlandiya, İtalya, Hollanda ve Birleşik Krallık) katkısıyla oluşturulan bir siber güvenlik farkındalığı eğitim topluluğudur (Langner ve ark., 2021).

Bir bütün olarak *siber güvenlik* terimi, içinde barındırdığı güvenlik yaklaşımlarından dolayı, askeri ve kolluk kuvvetlerinin alanında değerlendirilebilir. Nitekim siber uzayın temellerinin atıldığı İnternet, tam da böyle bir ortamda, ABD ordusuna bağlı Savunma İleri Düzey Araştırma Projeleri Ajansında (DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency) ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network: İleri Düzey Araştırma Projeleri Ajansı Ağı) adıyla ortaya çıktı. Daha da geriye gidildiğinde ise bilgisayar sistemlerinin askeri bir gerekçeyle II. Dünya Savaşı sırasında ortaya çıktığı bilinmektedir. 1936 yılında Konrad Zuse tarafından ilk programlanabilir bilgisayar olan Z3, Almanlarca şifreli yazılar üretmek için kullanılmaktaydı. Daha bilindik olan ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer: Elektronik Sayısal Entegratör ve Hesaplayıcı) ise modern bilgisayarın ilk ürünü olarak kabul edilmektedir. ENIAC da ABD ordusunun isteği üzerine 1947 yılında füze ve top atışlarının hesaplanması için John Mauchly ve J. Presper Eckert öncülüğünde geliştirilmişti.

NATO'nun Estonya'nın başkenti Tallinn'de bulunan Siber Savunma Mükemmeliyet Merkezinin (Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence) 2010'da düzenlemeye başladığı Kilitli Kalkan (Locked Shields) (The NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence, 2024) siber tatbikatına 2014'ten bu yana Türkiye'den TSK Siber Savunma Komutanlığının yanı sıra ilgili kamu ve özel sektör temsilcileri katılım sağlamaktadır (T.C. Milli Savunma Bakanlığı, 2023). Buradan hareketle varılabilecek sonuçlardan biri de Bayrağı Yakala Yarışması'nın eğitim ve öğretimdeki yaygınlığıyla birlikte etkisinin de oldukça geniş olduğudur.

Yukarıdaki örneklerle ortaya konulduğu üzere ulusal güvenlikle ilgili sanal ve fiziki unsur ayırt etmeksizin sıcak çatışmalar ya da askeri operasyonlar ordu ve kolluk güçlerinin birincil sorumluk alanında değerlendirilmektedir. Söz konusu siber uzay olduğunda ise güvenlik, çok katmanlı yapısı dolayısıyla toplumun bütünüyle doğrudan

ilgili olmaktadır. Yanı sıra dijital teknolojilerin doğası, alan üzerinde yüksek niteliklerle spesifik çalışmalar yürütebilen uzmanları gerekli kılmaktadır. Gelişmiş ülkelerde ordu ve emniyetin içinde yetişen mühendis sınıflarının yanı sıra akademisyen ve teknik bireylerin iş birliğiyle çalışmalar yapılmaktadır. Siber güvenlik, elbette yalnızca ordu ve emniyetin sorumluluk alanında tutulabilecek bir saha değildir. Nitekim akıllı telefonlar ve Nesnelerin İnternet’i (IoT: Internet of Things) teknoloji yaygınlaşmasıyla birlikte bilişim teknolojileri yalnızca askerinin/emniyetin hizmetinde değil her bir vatandaşın evindeki süpürgeye, mutfak gereçlerine, cebindeki telefona, odasındaki lambaya, bileğindeki saate, kapısındaki kilide ve dahi kişilerin organlarına değin girmiş durumdadır. Klasik savaşlar ya da sıcak çatışmalardan önce siber savaşlar yaşanmakta ve kimileyin de savaş ortamı konvansiyonel olarak ortaya çıkmadan uzun süre ülkeler arasındaki mücadele siber uzayda güç yarışına evrilebilmektedir. İşbu gerekçeler nitelikli insan gücünün ne denli önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Nitelikli insan gücünün var olması da formal ve informal öğretim içerikleri ve öğretmenlerin varlığıyla mümkün olabilmektedir.

2.3. Türkiye’nin Siber Güvenlik Alanındaki Nitelikli İş Gücü Politikası

Dil, toplumsal olaylardan etkilenerek yaşayan canlı bir varlıktır. Toplumı ilgilendiren ciddi konulardaki olayların dil üzerinde etkisinden söz etmek olasıdır. Konu kapsamında ele alındığında savunma sanayii alanındaki gelişmeler, dile yeni kavramların girmesine zemin hazırlamıştır. İlk olarak “Mavi Vatan” olarak üretilen bu söz öbeği “Gök Vatan” ve “Siber Vatan” ifadelerinin kavramlaşmasına zemin oluşturmuştur. Nitekim bu kavramların yerleşikliği, devletin öncelik ve önem verdiği güvenlik politikalarının da bir göstergesi olarak yorumlanabilir. Bu yaklaşımla Aydın tarafından (Aydın, 2022) *siber vatan* kavramı, “Türkiye’nin dijital araçları ve kurumsal İnternet alanındaki altyapısını koruma doktrininin adı.” olarak açıklanmaktadır.

Türkiye özelinde kamu kurumlarının çeşitlenerek kurulması ve hem lise hem de üniversitelerde uzmanlık düzeyinde bölümlerin açılmasıyla akademik ve teknik çalışmaların nicelik ve niteliklerinde artışlar olmaktadır. Farklı alanlarda kurumlarının açılması, konunun ciddiyetinin ve hassasiyetinin devlet politikası olarak etkin varlık gösterdiğine yönelik yorumlanabilir. Nitekim 2018 yılında kurulan ve kamusal olarak siber güvenlik faaliyetlerinin sorumlusu olarak kapsayıcı yetki alanına sahip Dijital Dönüşüm Ofisi (DDO) (T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı, 2024), doğrudan Cumhurbaşkanlığına bağlı bir başkanlıktır. DDO, Türkiye’de ilk olarak kurulan Siber Güvenlik Meslek Yüksekokullarının kuruculuğunu üstlenmiştir. Bununla birlikte DDO, Türkiye’nin ilk siber güvenlik lisesi Teknopark İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinin de kurucu unsurları arasındadır. Ayrıca, Dijital Dönüşüm Ofisi tarafından Milli Eğitim Bakanlığı iş birliğiyle ilkökul, ortaokul ve lise öğrencilerine yönelik “Siber Zeka Bilgi Yarışması” (T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı, 2020) 2020’den bu yana düzenlenmektedir.

Siber güvenlik alanındaki nitelikli insan gücünün yetiştirilmesi çalışmalarında SSB bünyesinde faaliyet gösteren Türkiye Siber Güvenlik Kümelenmesinden (Siber Küme) söz edilebilir. 2018 yılında kurulan Siber Küme, çevrim içi ve yüz yüze olarak gerçekleştirdiği öğretim faaliyetleriyle sektörel iş birliklerini artırmakla birlikte lise ve üniversite öğrencilerine yönelik yaz kampı, kış kampı ve gece eğitim programları sunmaktadır. Bunların yanı sıra Siber Küme de Teknopark İstanbul MTAL’nin

paydaşları arasındadır. Bu çalışmanın kapsamı gereği Siber Küme'nin iki hedefine (Türkiye Siber Güvenlik Kümelenmesi, 2024) burada yer verilebilir: 1) *Siber güvenlik alanındaki insan kaynağı sayısı ve niteliğini arttırmak.* 2) *Toplumdaki siber güvenlik bilincini arttırmak.*

TRT Çocuk ve Emniyet Genel Müdürlüğü Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı ortaklığıyla çocuklara yönelik hazırlanan ve 14 Mayıs 2022 tarihinde yayınlanan “Ekip: SİBERAY” (Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı, 2020) çizgi filmi dizisi aynı zamanda sinema filmi olarak 5 Nisan 2024'te vizyona girmiştir.

Yukarıdaki ifadelerin yanı sıra bu alt başlıkta, Cumhurbaşkanlığı ve Bakanlık düzeyinde yayınlanan ilgili belgeler doğrultusunda Türkiye'nin siber güvenlik alanındaki nitelikli iş gücü politikasına genel bir bakış ortaya konacaktır. Söz konusu belgelerde yer alan stratejik ifadeler, aynı zamanda ele alınan bu dönem projesinin bir tür dayanağı ve çıktısı olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, küresel anlamda bir sorun olan nitelikli siber güvenlik uzmanı yetiştirilmesine yönelik Türk devletinin en üst düzeyde işaret ettiği etkin politikasını göstermesi açısından da önem arz etmektedir.

Güncel olarak iki belgenin varlığı görülmektedir. Resmi olarak belirtilen adlarıyla:

1. 2024 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023)
2. Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı (2020-2023) (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020)

2024 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı'nda siber güvenlik öğretimi ve alan üzerine nitelikli iş gücünün yetiştirilmesine yönelik eylem planlarının yer aldığı görülmektedir.

- *Tedbir 521.4* olarak yer verilen “Gerek savunma ve güvenlik gerekse sivil alanda siber güvenlik ihtiyaçları, azami ölçüde yerli ve yetkin çözümlerle karşılanacaktır.” ile *Kalkınma Planı p.582*'de “Yerli siber güvenlik ekosisteminin gelişmesi, milli çözümlerin yaygınlaşması ve uluslararası rekabet gücünün artırılması sağlanacaktır.” (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) yaklaşımları önemlidir. Nitekim siber güvenlik öğretimi üzerine yabancı çözümler yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı'nda *Kalkınma Planı p.452*, *Kalkınma Planı p.557* ve *Kalkınma Planı p.583* başlıklarında (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) yapay zeka ve siber güvenliğin de yer aldığı güncel teknolojilerin ihtiyaç duyduğu altyapıların tesis edilmesi ve ihtiyaç duyulan nitelikli insan kaynağının yetiştirilmesine vurgu yapılmaktadır.

Siber güvenlik, ekonomik boyutunun yanı sıra ulusal güvenlikle yakından ilgilidir. Bu yönüyle kritik bir öneme sahip olduğu Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı'nda da yinelenmektedir.

- *Tedbir 583.1*'de (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) “Siber güvenlik alanında nitelikli işgücünün yetiştirilmesine ve kariyer

olanaklarının iyileştirilmesine yönelik programlar geliştirilecektir.” ifadesinde alt ifade olarak “Nitelikli genç istihdama yönelik siber güvenlik yarışmaları düzenlenecektir.” denilmektedir.

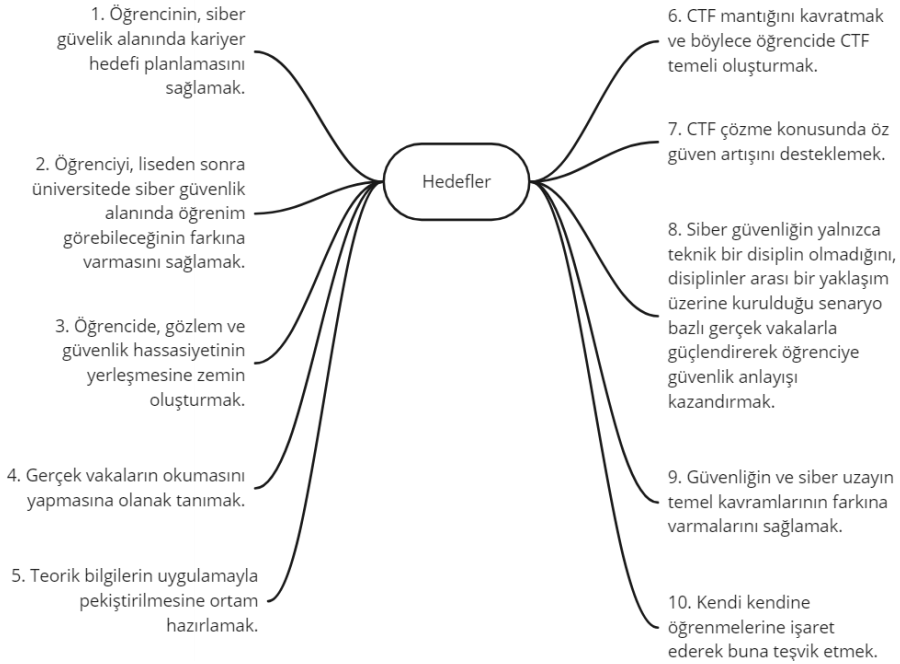
- *Tedbir 583.3*'te (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) “Sektör ihtiyaçlarına uygun işgücünün yetiştirilmesi amacıyla eğitim içerikleri, niteliği ve ortamı geliştirilecektir.” ifadesinin altında “Çevrim içi ve laboratuvar ortamında siber güvenlik eğitimleri gerçekleştirilecektir.” hedefi de siber güvenlik yarışmalarının süreçte etkin yer almasına işaret etmektedir.
- *Tedbir 583.4*'te (T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2023) “Siber güvenlik farkındalığına yönelik seminer, eğitim, yarışma gibi etkinlikler gerçekleştirilecektir.” ve “İlk ve ortaöğretim seviyesinde siber güvenliğe yönelik ders içeriğinin geliştirilmesi çalışmaları yapılacaktır.” hedefleri yetkin siber güvenlik profesyonellerinin örgün müfredat aracılığıyla yetiştirilmesine yöneliktir.

Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı (2020-2023) belgesinde (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2020) nitelikli iş gücünün yetiştirilmesine yönelik “Süreçlerin iyileştirilmesi, teknolojik bileşenlerden azami seviyede istifade edilmesi ve insan kaynağının geliştirilmesine yönelik eylemlerle siber güvenlik seviyesinin daha da yükseltilmesi amaçlanmıştır.” ifadeleri bulunmaktadır. Yanı sıra ilgili belgede “İlk ve orta dereceli okullar ile yükseköğretimde siber güvenlik eğitim içeriklerinin zenginleştirilmesi ve yaygınlaştırılmasını hedef alan eylemlerle bu alandaki insan kaynağının artırılması amaçlanmıştır.” yine bu çalışmanın kapsamında değerli ifadelerdir. İlgili belgenin *Ulusal Siber Güvenlik Hedeflerimiz* başlığında geçen şu ifadeler dikkat çekicidir: “Siber güvenliğe ilgi duyan veya uzmanlaşmak isteyen bireylere yönelik projelerle insan kaynağının güçlendirilmesi.”.

3. ÖNERİLEN EĞİTİM SİSTEMİ YAKLAŞIMI

Ele alınan çalışmanın işe yararlılığını ortaya koymak ve disiplinli bir biçimde konuları ele alabilmenin yolunun, öncelikli olarak söz konusu projenin hedeflerinin açık biçimde yazılmasından geçtiğini düşünmekteyiz. Bu başlık altında önerilen eğitim sisteminin hedefleri ve gerçekleştirildiğinde öğrencinin edineceği öngörülen kazanımlar açıklanacaktır.

Bayrak Sende adında bir platform üzerinde kurgulanan tüm senaryo ve soruların, amacına bütünüyle hizmet edebilmesi için Şekil 2’de belirtilen hedeflerle uyumlu olmasına özen gösterilmesi beklenmektedir.



Şekil 2. Önerilen Eğitim Sistemi Yaklaşımı

1. hedef: Öğrencinin, siber güvenlik alanında kariyer hedefi planlamasını sağlamak.

Kazanımı: Teknolojik cihazların toplum geneline yaygınlaşmasıyla İnternet'e bağlanan bu cihazlar, siber uzaydaki varlıkların sayısında devasa artışlara yol açmaktadır. Bu genişlemenin bir sonucu olarak söz konusu varlıklara yönelik tehditlerin artması doğru bir korelasyon göstermektedir. Bu noktada toplumsal bir siber güvenlik bilincinin gerekliliği konuşulurken alan üzerine profesyonellerin eğitimi de dünya genelinde gündemde olan bir konudur. Tıpkı sağlıklı biçimde istihbarat ve güvenlik algısının toplumda yaygınlaşmasıyla oluşacak bilinçteki katkılarında olduğu gibi siber güvenlikte de kamusal bilincin benimsenmesi güvenliğin temel çatısından ayrı görülmemelidir. Siber güvenilir bir toplum ancak böylesi bir yaygın bilinçlenmeden geçmektedir. Siber Vatan'ın direnci nitelikli insan gücünün varlığıyla olasıdır.

Siber güvenlikte nitelikli iş gücünün oluşturulması ve var olan potansiyelin güçlendirilmesi, toplumda siber güvenliğin bir kariyer yolu olarak görülmesiyle doğrudan bağlantılıdır.

Caroline Rose Ster, doktora tezinde (Ster, 2019) siber güvenlikte uzman eksikliğinin nedenlerinden biri olarak siber güvenliğin bir kariyer planı olarak değerlendirilebileceğinin farkında olunmamasına bağlamaktadır. Yazar, düzenlenen siber güvenlik etkinliklerini uygun bir halkla ilişkiler çalışmalarıyla desteklenmesini bu yüzden önemsemektedir. Ster, halkla ilişkiler çalışmasında yalnızca öğrencileri değil ailelerini de hedeflediklerini ifade etmektedir çünkü siber güvenliğin bir kariyer planına dahil edilebilmesinde ebeveynlerin de etkisinin olduğunu düşünmektedir. Yazar, anne-

babaların siber güvenlik alanında bir gelecek görürlerse çocuklarını da bu gibi etkinliklere katılmalarında teşvik edici olacaklarını ifade etmektedir. Elbette, *Bayrak Sende* platformunun amacı doğrudan ailelere yönelik değildir. Bu ifadelere yer verilmesindeki amaç, siber güvenlikte kariyer planlaması yapılmak istendiğinde bunun yalnızca öğrenciyle sınırlı olmadığını vurgulamaktır.

Türkiye’de olduğu gibi yurt dışında da nitelikli üniversitelerden kabul almanın daha rekabetçi bir hale geldiği yapılan araştırmalarda (Ster, 2019) dile getirilmektedir. Liseye geçiş sınavında da benzer bir zorluğun olduğu bilinmektedir. Bu rekabet daha ortaokulda başlamaktadır. Öğrencinin, liseye giriş sınavında iyi bir sıralamaya girmek ve yüksek puan alabilmek adına ilgi duyduğu sanatsal ve/veya bilimsel faaliyetlerden geri durmak zorunda kalmaktadır.

Ortaokul yıllarının ardından liseye geçen öğrenci, ortaokuldaki gibi üniversite sınavına yoğunlaşmadan önce siber güvenlik alanındaki ilgisini kariyere yönlendirmek bu açıdan bir zaman aralığı tanıyabilmektedir. Böylesi bir sınav maratonunda ders dışı etkinliklerde heveslendirici ve heyecan uyandırıcı faaliyetlerin önemi ve katkısı yüksek olmaktadır. Ortaokul ve lise yıllarında siber güvenlik faaliyetleri içerisinde olan öğrenci, bir sonraki eğitim düzeyine geçeceği bu alanı deneyimlemiş olduğundan karar vermede daha isabetli ve sürdürülebilir bir sonuca ulaşabilir.

White ve ark. (White, Williams, & Harrison, 2010) siber güvenliğe olan hazırlığın üniversiteden önce başlatılmasını ifade ettikleri çalışmalarında, ABD’de uygulanan “Cyber Patriot”ı incelemektedirler. Çünkü lise düzeyindeki öğrencilerin kariyer planlamada henüz yolun başında ve ilgi alanlarını keşfetme sürecinde oldukları için lise öğrencilerine yönelik faaliyetlere dikkat çekmektedirler.

ABD’de siber güvenlik alanında çalışacak nitelikli iş gücünün oluşturulması ve geliştirilmesi güvenlik teşkilatlarının da sorumluluk alanında değerlendirilmektedir. Öyle ki ABD Siber Komutanlığı, Ulusal Güvenlik Ajansı ve İç Güvenlik Bakanlığının bu yönde etkin yer aldığı görülmektedir. Üniversitelerle iş birliği içerisinde olan bu devlet kurumları (White, Williams, & Harrison, 2010) siber güvenlik yarışmaları düzenlemektedirler. Yapılan akademik çalışmalarla desteklenmektedir ki BYY gibi siber güvenlik yarışmalarının öğrencilere siber güvenlik alanında ufuklar açtığı ve kariyer olasılıklarını sunma konusunda başarılıdır. Carnegie Mellon Üniversitesinin siber güvenlik programları ve çalışmaları doğrudan NSA ve DHS tarafından desteklenmekte ve ilgili web sayfasında (Carnegie Mellon University CyLab, 2024) açıkça belirtilmektedir. ABD’deki siber güvenlik faaliyetlerinde kamu kurumlarının etkin bir yapılanma ve iş birliği içinde olduğu görülmektedir. ABD’nin etkin istihbarat servislerinden olan ve Savunma Bakanlığına bağlı olarak faaliyet gösteren NSA bu konuda, çocuklar ve gençler arasında siber güvenliğe olan ilginin artırılması noktasında görev üstlenmektedir. Ulusal Bilim Vakfı ile destekledikleri GenCyber projesi, doğrudan K-12 düzeyindeki öğrencilere odaklıdır.

2022 yılında ABD’de yapılan bir araştırmada liseden mezun olanların %75’inin üniversite seçiminde ve kariyer planlamada karar vermeye yeterince hazırlıklı olmadıkları ifade edilmektedir. Öğrenciler, iş hayatına atılmada kendilerini yeterli görmediklerini düşündüklerini belirtmektedir (Wagner, 2023).

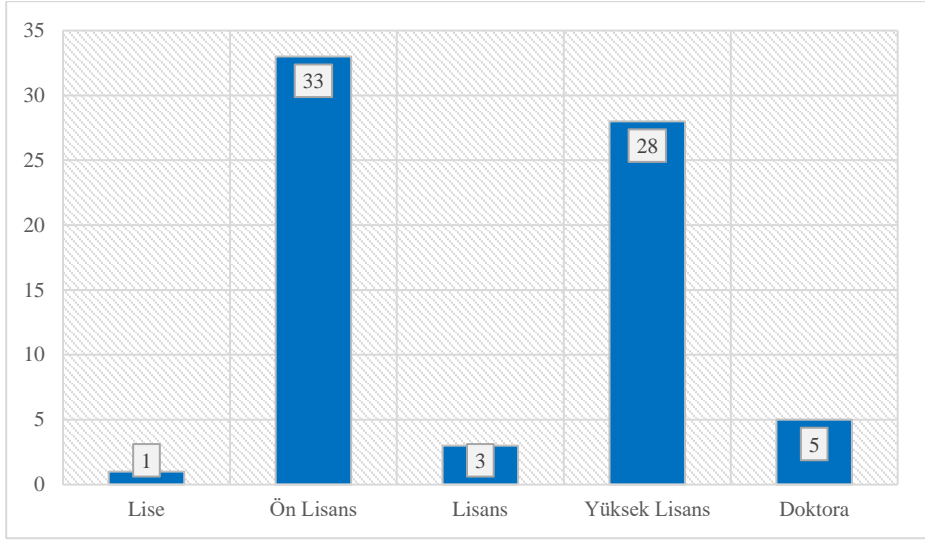
2021 yılına ait bir araştırmada Avrupa ve ABD'nin siber güvenlik iş gücünde %30'luk bir artış olduğu kaydedilse de siber güvenlik uzmanlarına yönelik küresel ihtiyaçtaki mevcuttaki iş gücüne kıyasla makasın açıldığına dikkat çekilmektedir. Ülkenin maruz kaldığı ve kalacağı siber saldırılara karşı savunmanın ön cephesini oluşturan yetkin siber güvenlik personelinin hazırbulunuşluğunu zorunlu kılmaktadır. Bu hazırbulunuşluğun desteklenmesi ve kapasitenin artırılması için de şirketler ve kurumlar hizmet içi eğitim ve öğretimle buna katkı sağlayabilir. Yunanistan'da yapılan bir çalışmada (Katsantonis ve ark., 2023) bu endişelere yer verilmektedir.

Microsoft'tan Lewis Shepherd'ın (White ve ark., 2010) yetenekli siber güvenlik personellerine olan ihtiyacın, yetiştirilen öğrencilerin çok ötesinde olduğunu ifade etmesi ve bunun ABD başta olmak üzere diğer ülkelerdeki eğitim sistemlerinin yetersiz kalmasına değinmesi önemli bir ayrıntıdır. Yanı sıra MITRE'den Cherinka ve Prezzama'nın (Cherinka & Prezzama, 2015) da dikkat çektiği üzere kariyerinin başındaki birey, kendince tecrübeli olan meslektaşlarına göre daha yenilikçi ve heyecan verici fikirlerle atılım gösterme eğilimindedirler.

2. hedef: Öğrenciyi, liseden sonra üniversitede siber güvenlik alanında öğrenim görebileceğinin farkına varmasını sağlamak.

Kazanımı: Öğrencilerin, liseden mezun olduklarında üniversite kariyerlerine doğrudan siber güvenlikte devam etmeleri mümkündür.

Dijital Dönüşüm Ofisi öncülüğünde kurularak 2023-2024 yılında eğitim ve öğretime başlayan Siber Güvenlik Meslek Yüksekokulları bulunmaktadır (T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı, 2023). Yükseköğretim Kurulunun Ön Lisans Atlası'ndan edinilen bilgiler doğrultusunda Siber Güvenlik MYO'larına ek olarak ön lisans düzeyinde "Siber Güvenlik", "Bilişim Güvenliği Teknolojisi" adlarıyla tercih edilebilirler. Lisans olarak "Adli Bilişim Mühendisliği" ve "Bilgi Güvenliği Teknolojisi" adıyla iki bölüm bulunmaktadır (Yükseköğretim Kurulu, 2024). Lisansüstü düzeyinde ise vakıf ve devlet üniversitelerinde yüksek lisans ve doktora eğitimleri oldukça çeşitlidir. Türkiye'de siber güvenlik alanında eğitim ve öğretim programı uygulayan okulların sınıflandırması ve sayısı Şekil 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Türkiye Özelinde Siber Güvenlik Alanında Eğitim Veren Okul Sayısı

3. hedef: Öğrencide, gözlem ve güvenlik hassasiyetinin yerleşmesine zemin oluşturmak.

Kazanımı: Kurgulanacak senaryolarda ve hazırlanacak sorularda yalnızca bilgisayar bilimlerinde yetkinlik oluşturmak/geliştirmekle yetinilmemesi önerilmektedir. Nitekim siber güvenlik bir bütün olarak ele alınması gereken bir disiplindir. Söz öbeğinin başında “siber” olması, peşi sıra gelen “güvenlik” ifadesinin dışında tutulmamalıdır. Bu araştırma çalışmasında ayrıca değinildiği üzere siber güvenlik, ulusal güvenlikten bağımsız değildir. Buradan hareketle senaryo ve soruların içeriğinde öğrencinin gözlem ve güvenlik hassasiyetinin oluşmasına/geliştirilmesine katkı sağlayacak bir yaklaşım ortaya konulmalıdır.

4. hedef: Gerçek vakaların okumasını yapmasına olanak tanımak.

Kazanımı: Bayrak Sende’de ortaya konan her bir görev olabildiğince yaşanmış vakalarla desteklenmelidir. Bu kazanım, özellikle öğrencinin teorik ya da uygulamalı gördüğü derslerde öğretmenine yönelttiği “Bu bilgiler gerçek hayatta ne işime yarayacak?” sorgulamasını besleyen bir yöne sahiptir. Örneğin, seyahat güvenliği üzerine bir görevdeki sorunları çözmeye çalıştığında bunun öylesine yazılmak için ele alınan bir soru olmadığının farkına varabilecektir çünkü seyahat güvenliği dikkate alınmadığında üst düzey görevlilerin kriptolu cihazlarına bile sızlabildiğini açık kaynaklara yansıyan siber espionaj faaliyetiyle görebilir olacaktır.

5. hedef: Teorik bilgilerin uygulamayla pekiştirilmesine ortam hazırlamak.

Kazanımı: Uygulama yapmak, etkili bir öğrenme yöntemidir. Siber güvenlik çözümlerinde tek bir çözüm yönteminin olmayışı ona bir açık uçlu sorulardaki gibi yanıt verirken özgür bir ifade ortamı sunabilmektedir. Bu da öğrencinin bağımsız

düşünebilmesi gibi bilişsel becerilerini kullanmasına zemin bırakır (Rowe, Lunt, & Ekstrom, 2011). Öğrenimin pekiştirilmesi adına uygulamalı laboratuvarların kullanımının üretkenliği ve etki düzeyini arttırdığı bilinmektedir (Son, Irrechukwu, & Fitzgibbons, 2012). Pedagojik uygulama alanlarından biri olan bu yöntem eğitim bilimlerinde sıkça vurgulanan Howard Gardner'ın "Çoklu Zeka Kuramı"nda da bulunmaktadır.

6. hedef: *BYY mantığını kavratmak ve böylece öğrencide BYY temeli oluşturmak.*

Kazanımı: Öğrenimin varacağı nihai nokta öğrencisine bayrağı yakalatmaktır. Öğrenci, Bayrak Sende'deki görevleri tamamladıkça bir BYY'nin ne olduğunu, katılımcısından neler beklediğini, BYY'deki sorulara nasıl yaklaşılması gerektiği noktalarında bir kavrayış oluşturulması hedeflenmektedir.

7. hedef: *BYY çözme konusunda öz güven artışı desteklemek.*

Kazanımı: Bayrak Sende'deki görevler, öğreticilik sağlarken BYY'lerdeki mantığı temele alarak soruları öğrenciye yöneltir. Böylelikle öğrenci, platformu etkin kullandıkça BYY'leri çözerek eleştirel bakış kazanabilecek, problem çözme becerilerini geliştirebilecek ve bir sonraki aşamalarda ulusal ve uluslararası BYY'lere katılmada öz güvenini güçlendirebilecektir. Öz güvenin olması kişisel hayatında da etki sağlayabileceği gibi teknik olarak da daha ileri öğrenmeler ve gelişimler için sağlam bir temel olacaktır.

8. hedef: *Siber güvenliğin yalnızca teknik bir disiplin olmadığını, disiplinler arası bir yaklaşım üzerine kurulduğu senaryo bazlı gerçek vakalarla güçlendirerek öğrenciye güvenlik anlayışı kazandırmak.*

Kazanımı: Siber uzayın, ulusal güvenlikle ilişkisine yönelik yaklaşımlar "Ulusal Güvenlik Bağlamında Siber Uzay" bağlığında ortaya konmaya çalışılmıştı. Bu bilgiler doğrultusunda öğrenciye gerçek hayatta yaşanan vakalar üzerinden senaryolar sunularak öğrendiği/öğreneceği bilgilerin nerelerde hangi amaçlar nasıl kullanılacağı noktasında bir bakış kazandırılması önceliklendirilmektedir.

9. hedef: *Güvenliğin ve siber uzayın temel kavramlarının farkına varmalarını sağlamak.*

Kazanımı: Temel kavramlar çoğunlukla basit ve geçirilecek konular gibi algılanır. Ne ki, bu yaygın kanının aksine yeni başlayan birisi için temel kavramların doğru biçimde edinilmesi sonraki öğrenme aşamasında sağlıklı bir zemin hazırlar. Temel kavramları öğretmek yalnızca terim açıklamalarını retorik olarak ele almak olarak değerlendirilmemelidir. Bu hedefle birlikte öğrenciye sağlam bir temel oluşturulması amaçlanmaktadır. Böylece, sağlam zemin üzerine inşa edilecek bina öğrencinin kendi çabasıyla mümkün olabilecektir.

10. hedef: *Kendi kendine öğrenmelerine işaret ederek buna teşvik etmek.*

Kazanımı: Siber güvenlik alanı sürekli öğrenimi gerektiren bir yapıya sahiptir. Konu çeşitliliği, derinliği ve hareketliliği yönleriyle tıp bilimiyle benzerlik göstermektedir.

Bu doğrultuda öğrencisinden ömür boyu öğrenci kalabilmeyi bekler. Bayrak Sende'deki iletişim yaklaşımı ve görevlerdeki içerikler de bu kapsamda ele alınabilmelidir. Öğrenmeyi öğrenen bir öğrenci, öz disiplini edinebildiğinde öz motifini bularak kendi hedefleri doğrultusunda kararlı bir ilerleme ortaya koyabilecektir.

6. SONUÇ

Siber uzay geleneksel harp sahaları olan kara, deniz, hava ve uzaydan sonra beşinci saha olarak güvenlik literatüründeki yerini almıştır. Siber güvenlik gibi çok yönlü bir disipline sahip alandaki nitelikli profesyonel eksikliği ise gerek özel sektörde gerek kamuda ciddi güvenlik sorunlarına neden olmaktadır. Bilişim teknolojilerinin toplumun her alanına girmesi, devletin kritik altyapılarının ve varlıklarının dijitalleşmesi gibi gelişmeler siber uzayı ulusal güvenliğin merkez noktasına taşımaktadır. Bu noktada ülkeler, siber güvenlikte yetkin insan gücünü eğitmek, geliştirmek ve istihdam etmek adına çeşitli faaliyetler ortaya koymaktadır. Bunlardan biri de bayrağı yakala yarışmalarıdır. Bu çalışmada, siber güvenlik alanında istihdam edilecek nitelikli iş gücünün yetiştirilmesinde bir eğitim yaklaşımı olarak bayrağı yakala yarışmalarının geçerliği üzerinde durularak bir yaklaşım sunmaya çalışılmış olup bir öğretim modeli hedefler ve kazanımlarıyla aktarılmıştır.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır. Bu çalışmada Cafer ULUÇ fikir, araştırma, kaynak taraması, değerlendirme, analiz, bilgisayar ortamında testlerin gerçekleştirilmesi ve makalenin yazımı konusunda katkıda bulunmuştur. Can EYÜPOĞLU fikir, eleştiri, danışmanlık, yazım dili, araştırma, kaynak taraması, makalenin yazımı ve değerlendirilmesi konusunda katkı sağlamıştır.

Teşekkür

Teknopark İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi öğrencilerine araştırma boyunca sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Albert, R. T., & Wallingford, J. L. (2010). Cyber Defense Competitions-Educating for Prevention. *Proceedings of the 2010 ASCUE Summer Conference*, (s. 22-30). North Myrtle Beach, SC, USA.

- Aydın, E. (2022). Mavi Vatan, Gök Vatan ile Siber Vatan Söz Öbeklerinin Anlamları ve Oluşturulma Yöntemleri. *The Journal of Turkic Language and Literature Surveys (TULLIS)*, s. 168-178.
- California Cybersecurity Institute. (2024). *Our Supporters*. <https://cci.calpoly.edu/about-cci/our-supporters> adresinden 29 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Canadian Centre for Cyber Security. (2022). *An Introduction to the Cyber Threat Environment (2023-2024)*. Ottawa: Canadian Centre for Cyber Security. <https://www.cyber.gc.ca/sites/default/files/ncta-2022-intro-e.pdf> adresinden 17 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Carnegie Mellon University CyLab. (2024). *Education*. <https://www.cylab.cmu.edu/education/index.html> adresinden 29 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Chase, J. D., & Uppuluri, P. (2022). High School Cybersecurity? Challenge Accepted – Radford University’s RUSecure CTF Contest for High School Students. *Journal of The Colloquium for Information Systems Security Education*, 9(1), s. 1-6.
- Cherinka, R., & Prezzama, J. (2015). Innovative Approaches to Building Comprehensive Talent Pipelines: Helping to Grow a Strong and Diverse Professional Workforce. *Systemics, Cybernetics and Informatics*, 13(6), s. 82-86.
- Chou, T.-S., & Jones, J. (2018). Developing and Evaluating an Experimental Learning Environment for Cyber Security Education. *SIGITE '18: Proceedings of the 19th Annual SIG Conference on Information Technology Education*, (s. 92-97). Fort Lauderdale, FL, USA.
- Chung, K. (2017). Lowering the Barriers to Capture The Flag Administration and Participation. *USENIX Workshop on Advances in Security Education*. Vancouver, BC, Canada.
- Chung, K., & Cohen, J. (2014). Learning Obstacles in the Capture The Flag Model. *USENIX Summit on Gaming, Games, and Gamification in Security Education*. San Diego, CA, USA.
- Conti, G., Babbitt, T., & Nelson, J. (2011, 5 23). Hacking Competitions and Their Untapped Potential for Security Education. *IEEE Security & Privacy*, s. 56-59.
- Cooper, T. T., & Harris, J. T. (2022). Cyber Red Zone: Capture-the-Flag the DoD Way! *MODSIM World 2022: Building a Better Tomorrow*. Norfolk, VA, USA.
- Cusak, A. (2023). Case Study: The Impact of Emerging Technologies on Cybersecurity Education and Workforces. *Journal of Cybersecurity Education, Research and Practice*, s. 1-12.

- Cyber Patriot. (2024). *Elementary School Cyber Education Initiative*. <https://www.uscyberpatriot.org/Pages/Special%20Initiatives/Elementary-School-Initiative.aspx> adresinden 24 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Cyber Patriot. (2024). *Sponsors*. <https://www.uscyberpatriot.org/Pages/About/Sponsors.aspx> adresinden 24 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Cyber Patriot. (2024). *What is Cyber Patriot?* <https://www.uscyberpatriot.org/Pages/About/What-is-CyberPatriot.aspx> adresinden 24 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (2024). *Cybersecurity Awareness Month*. <https://www.cisa.gov/cybersecurity-awareness-month> adresinden 27 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Davis, A., Leek, T., Zhivich, M., Gwinnup, K., & Leonard, W. (2014). *The Fun and Future of CTF. USENIX Summit on Gaming, Games, and Gamification in Security Education*. San Diego, CA, USA.
- Defense News. (2024). *Top 100 Defense Companies*. <https://people.defensenews.com/top-100/> adresinden 29 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Dill, K. J. (2018). *Cybersecurity for the Nation: Workforce Development*. *The Cyber Defense Review*, s. 55-64.
- Eagle, C., & Clark, J. L. (2004). *Capture-the-Flag: Learning Computer Security Under Fire*. *Proceedings from the Sixth Workshop on Education in Computer Security (WECS6)*, (s. 18-21). Monterey, CA, USA.
- Ford, V., Siraj, A., Haynes, A., & Brown, E. (2017). *Capture the Flag Unplugged: An Offline Cyber Competition*. *Proceedings of the 2017 ACM SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education*, (s. 225-230). Seattle Washington, USA.
- Government of the United Kingdom. (2015, 11 21). *National Security Strategy and Strategic Defence and Security Review 2015*. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a74c796ed915d502d6caefc/52309_Cm_9161_NSS_SD_Review_web_only.pdf adresinden 1 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Haggman, A. (2019). *Cyber Wargaming: Finding, Designing, and Playing Wargames for Cyber Security Education*. London, UK: Royal Holloway, University of London.
- Hendrix, M., Al-Sherbaz, A., & Bloom, V. (2016). *Game Based Cyber Security Training are Serious Games Suitable for Cybersecurity Training?* *International Journal of Serious Games*, s. 53-61.

- Katsantonis, M. N., Manikas, A., Mavridis, I., & Gritzalis, D. (2023). Cyber Range Design Framework for Cyber Security Education and Training. *International Journal of Information Security*, 3(18), s. 1005-1027.
- Katzcy Consulting. (2016). *Cybersecurity Games: Building Tomorrow's Workforce*.
- Küçükçekmece İlçe Milli Eğitim Müdürlüğü. (2016). *Liseler Arası Bilişim Kampı*. <https://kucukcekmece.meb.gov.tr/www/liseler-arasi-bilisim-kampi/icerik/708> adresinden 5 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Langner, G., Andriessen, J., Quirchmayr, G., Furnell, S., Scarano, V., & Tokola, T. J. (2021). Poster: The Need for a Collaborative Approach to Cyber Security Education. *IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P)*, (s. 719-721). Vienna, Austria.
- LeClair, J., Abraham, S., & Shih, L. (2013). An Interdisciplinary Approach to Educating an Effective Cyber Security Workforce. *Information Security Curriculum Development Conference*, (s. 71-78). Kennesaw, GA, USA.
- Leune, K., & Petrilli, S. J. (2017). Using Capture-the-Flag to Enhance the Effectiveness of Cybersecurity Education. *SIGITE '17: Proceedings of the 18th Annual Conference on Information Technology Education*, (s. 47-52). New York, NY, USA.
- Li, C., & Kulkarni, R. (2016). Survey of Cybersecurity Education through Gamification. *ASEE's 123rd Annual Conference & Exposition*. News Orleans, LA, USA.
- Manson, D., Curl, S., & Carlin, A. (2012). CyberPatriot: Exploring University-High School Partnerships. *Communications of the IIMA*, s. 65-77.
- Matias, P., Barbosa, P., Cardoso, T. N., Campos, D. M., & Aranha, D. F. (2018, 12). NIZKCTF: A Noninteractive Zero-Knowledge Capture-the-Flag Platform. *IEEE Security & Privacy*, 16(6), s. 42-51.
- McGoogan, C. (2015, 10 1). *Want to be a GCHQ spy? Play this game*. <https://www.wired.co.uk/article/cyphinx-cybersecurity-game> adresinden 29 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Milli İstihbarat Teşkilatı. (2024). *2023 Yılı Faaliyet Raporu*. Ankara. <https://mit.gov.tr/uploads/f/znyYgMZdUvDr.PDF> adresinden 29 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Milli İstihbarat Teşkilatı. (2024). *İstihbarat Sözlüğü*. 2 <https://www.mit.gov.tr/sozluk.html> adresinden 3 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- National Initiative for Cybersecurity Education. (2024). *Events*. <https://niceconference.org/events/> adresinden 20 Şubat 2024 tarihinde alındı.

- Noor Azam, M., & Beuran, R. (2018). *Usability Evaluation of Open Source and Online Capture the Flag Platforms*. Nomi, Ishikawa, Japan: Japan Advanced Institute of Science and Technology (JAIST).
- Raman, R., Sunny, S., Pavithran, V., & Achuthan, K. (2014). Framework for Evaluating Capture the Flag (CTF) Security Competitions. *IEEE International Conference for Convergence of Technology*, (s. 1-5). Pune, India.
- Rowe, D. C., Lunt, B. M., & Ekstrom, J. J. (2011). The Role of Cyber-Security in Information Technology Education. *SIGITE '11: Proceedings of the 2011 Conference on Information Technology Education*, (s. 113-121). West Point, NY, USA.
- Siber Suçlarla Mücadele Daire Başkanlığı. (2020). *TRT Çocuk'ta "Ekip: SİBERAY"*. <https://www.siberay.com/trt-cocuk-ekranlarında-ekip-siberay> adresinden 10 Nisan 2024 tarihinde alındı.
- Son, J., Irrechukwu, C., & Fitzgibbons, P. (2012). Virtual Lab for Online Cyber Security Education. *Communications of the IIMA*, 12(4), s. 81-101.
- Ster, C. R. (2019). *Engaging High School Students Towards a Career in Cybersecurity*. San Luis Obispo, CA, USA: California Polytechnic State University.
- Švábenský, V., Čeleda, P., Vykopal, J., & Brišáková, S. (2020, 12 27). Cybersecurity Knowledge and Skills Taught in Capture the Flag Challenges. *Computers & Security*, s. 1-14.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı. (2020, 10 20). *Siber Zeka Bilgi Yarışması*. <https://cbddo.gov.tr/haberler/4906/siber-zeka-bilgi-yarismasi> adresinden 24 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı. (2023, 7 31). *Siber Güvenlik Meslek Yüksekokulları*. <https://cbddo.gov.tr/sss/siber-myoo/> adresinden 4 Mart 2024 tarihinde alındı.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Dijital Dönüşüm Ofisi Başkanlığı. (2024). *Hakkımızda*. <https://cbddo.gov.tr/hakkımızda/> adresinden 8 Mart 2024 tarihinde alındı.
- T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı. (2023). *2024 Yılı Cumhurbaşkanlığı Yıllık Programı*. Ankara.
- T.C. Milli Savunma Bakanlığı. (2023). *Kilitli Kalkan-2023 (Locked Shields-2023) Tatbikatı Başarıyla İcra Edildi*. <https://www.msb.gov.tr/Basin-ve-Yayin/Aciklamalar/985842bda91d49b7986792203ca5a602> adresinden 3 Mart 2024 tarihinde alındı.
- T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı. (2013). *Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve 2013-2014 Eylem Planı*. Ankara: T.C. Ulaştırma Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı.

- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2020). *Ulusal Siber Güvenlik Stratejisi ve Eylem Planı (2020-2023)*. Ankara.
- Tadjeh, Y. (2013). Industry, Military Emphasize Need for Cyberwarrior Training as Attacks Increase. *National Defense*, s. 46-48.
- Teknopark İstanbul Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi. (2023). 2015'ten 2020'ye Okulumuzun Kuruluş Öyküsü. *Betik(1)*, s. 48-53.
- The Economist. (2010). *War in the Fifth Domain*. <https://www.economist.com/briefing/2010/07/01/war-in-the-fifth-domain> adresinden 23 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- The NATO Cooperative Cyber Defence Centre of Excellence. (2024). *Locked Shields*. <https://ccdcoe.org/exercises/locked-shields/> adresinden 3 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Türkiye Siber Güvenlik Kümelenmesi. (2024). *Türkiye Siber Güvenlik Kümelenmesi*. <https://www.siberkume.org.tr> adresinden 24 Şubat 2024 tarihinde alındı.
- Uluç, C. (2017). *Liseler Arası Bilişim Kampı: Teknik Liselerde Bilgi Güvenliği Eğitimi Üzerine*. İstanbul: Kutlu Yayınevi.
- Ünal, A. Y. (2017, 19). "Siber yıldız" Olmak için 26 Bin Kişi Yarışacak. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/siber-yildiz-olmak-icin-26-bin-kisi-yarisacak/730467> adresinden 5 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Ünal, A. Y. (2017, 19). "Siber Yıldız" Olmak için 26 Bin Kişi Yarışacak. <https://www.aa.com.tr/tr/bilim-teknoloji/siber-yildiz-olmak-icin-26-bin-kisi-yarisacak/730467> adresinden 5 Mart 2024 tarihinde alındı.
- Wagner, P. (2023). *CyberEducation-By-Design: Developing a Framework for Cybersecurity Education at Secondary Education Institutions in Arizona*. Dakota, SD, USA: Dakota State University.
- Werther, J., Zhivich, M., Leek, T., & Zeldovich, N. (2011). Experiences in Cyber Security Education: The MIT Lincoln Laboratory Capture-the-Flag Exercise. *4th Workshop on Cyber Security Experimentation and Test (CSET 11)*. San Francisco, CA, USA.
- White, G. B., Williams, D., & Harrison, K. (2010). The CyberPatriot National High School Cyber Defense Competition. *IEEE Security & Privacy*, 8, s. 59-61.
- Wi, S., Choi, J., & Cha, S. K. (2018). Git-based CTF: A Simple and Effective Approach to Organizing In-Course Attack-and-Defense Security Competition. *ASE '18: USENIX Advances in Security Education Workshop*, (s. 1-9). Baltimore, MD, USA.

Yasin, A., Liu, L., Li, T., Wang, J., & Zowghi, D. (2018). Design and Preliminary Evaluation of a Cyber Security Requirements Education Game (SREG). *Information and Software Technology*, s. 179-200.

Yükseköğretim Kurulu. (2024). *Yükseköğretim Program Atlası*. <https://yokatlas.yok.gov.tr/index.php> adresinden 4 Mart 2024 tarihinde alındı.



E-EXACT SEQUENCE AND SOME RESULTS

E-TAM DİZİ VE BAZI SONUÇLAR

Abuzer GÜNDÜZ¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1434248>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
abuzergunduz@sakarya.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
09.02.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
15.06.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
26.06.2024

Abstract

Let R be a commutative ring with identity, M be a R -module and N be a submodule of M . N is called to be essential (large) in M if $N \cap Rm \neq 0$ for any nonzero element $m \in M$ and we showed by $N \leq_e M$. A sequence of R -modules and R -morphisms

$$\dots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots$$

is called exact at M_i if $Im(f_{i-1}) = Ker(f_i)$. Also this sequence is called e -exact at M_i if $Im(f_{i-1}) \leq_e Ker(f_i)$ and it is called e -exact if it is e -exact at each M_i . In this note, we present the concept of the characterization of E -homotopy and E -resolution with some results such as chain map for e -exact sequence and comparing theorem for e -exact sequence.

Keywords: E-injective modules, e-exact sequences, contravariant functor, homological algebra.

Öz

R birimli ve değişmeli bir halka, M bir R modül ve N , M 'nin bir alt modülü olsun. Eğer sıfırdan farklı bir $m \in M$ elemanı için $N \cap Rm \neq 0$ gerçekleşiyorsa N 'ye M 'nin bir büyük alt modülü denir ve $N \leq_e M$ ile gösterilir. Bir R -modül dizisi için

$$\dots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots$$

her M_i için $Im(f_{i-1}) = Ker(f_i)$ oluyorsa bu diziyeye tam (exact) dizi denir. Ayrıca her M_i için $Im(f_{i-1}) \leq_e Ker(f_i)$ oluyorsa bu diziyeye e-exact dizi denir. Bu çalışmada tam (exact) diziler teorisinin bir genişlemesi olan E -exact diziler teorisine için E -homotopy ve E -resolution tanımlanmış ve zincir map ve karşılaştırma teoremi gibi ilgili bir kısım sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: E-injektif modüller, e-tam diziler, kontravariant functor, homolojik cebir.

¹ Sakarya University, Faculty of Science, Department of Mathematics, Sakarya, Turkey.
abuzergunduz@sakarya.edu.tr, [Orcid.org/ 0000-0003-3351-2443](https://orcid.org/0000-0003-3351-2443).

1. INTRODUCTION

Let R be a commutative ring with identity and M, A_i be an R – module, for $i = 1,2$. Consider

$$A_1 \xrightarrow{f_1} A_2 \xrightarrow{f_2} A_3$$

an exact sequence of R –modules. Hence we have $Im(f_1) = Ker (f_2) (= f_2^{-1}(\{0\}))$. We can think a natural question: if we change a submodule U of R , what does happen for the trivial submodule $\{0\}$ in the above definition? This sequence is called U_3 – exact at A_3 if $Im(f_1) = f_2^{-1}(U_3)$, where U_3 is a submodule of A_3 . Firstly, In (Davaz, & Parnian-Garameleky, 1999), Davaz and Parnian-Garameleky answered this question. Also, In (Davvaz, 2002), Davaz and Shabani-Solt obtained a generaliation of some notations in homological algebra and new basic properties of U –homological algebra for U – exact sequence theory. Besides, in (Anvariye, & Davvaz, 2002), Anvariye and Davvaz studied over U – split sequences. In (Anvariye, & Davvaz, 2005), Anvariye and Davvaz proved further results about quasi-exact sequences such as an analogue of Schanuel’s Lemma for quasi-exact sequences. On the other hand, a submodule N of M is said to be essential (large) in M if the intersection of N with each nonzero submodule of M is nonzero, namely, $N \cap Rm \neq 0$ for any nonzero element $m \in M$ and we showed by $N \leq_e M$. A sequence of R – modules

$$\dots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \xrightarrow{f_{i+1}} \dots$$

is called exact at M_i if $Im(f_{i-1}) = Ker (f_i)$. In (Akay & Zebari, 2020), Akay and Zebari introduced the e – exact sequences as a generalization of exact sequences, like U – exact theory. The previous sequence is called e – exact at M_i if $Im(f_{i-1}) \leq_e Ker(f_i)$ and it is called e – exact if it is e – exact at each M_i . Particularly, they defined the sequence

$$0 \longrightarrow A_1 \xrightarrow{f_1} A_2 \xrightarrow{f_2} A_3 \longrightarrow 0$$

to be short e – exact if $Ker (f_i) = 0$, $Im(f_1) \leq_e Ker(f_2)$ and $Im(f_2) \leq_e A_3$. Also from (Akay & Zebari, 2020), an R – morphism $f_1:A_1 \rightarrow A_2$ is called epic if $Im(f_1) \leq_e A_2$ and essential monic if $Ker(f_1) = 0$. Obviously, the class of e – exact sequences is larger than the class of exact sequences. For instance, consider the short e – exact sequence

$$0 \longrightarrow 16\mathbb{Z} \xrightarrow{f_1} \mathbb{Z} \xrightarrow{f_2} \mathbb{Z}/16\mathbb{Z} \longrightarrow 0$$

where $f_1(16n) = 8n$ and $f_2(n) = 8n + 16\mathbb{Z}$. Since f_1 is monic, $Im(f_1) \leq_e Ker (f_2)$ and f_2 are epic, the sequence is e – exact. But the sequence is not exact, since f_2 is not an epimorphism.

In (Gunduz & Osama 2022), Gunduz and Osama defined a characterization of e -injective module in terms of contravariant functor $Hom(-, E)$.

We recall from (Tercan & Yücel 2016) some basic definitions. An element m of M is said to be torsion of M if there exists a regular element $r \in R$ such that $rm = 0$. The set of all torsion elements $T(M)$ is a submodule of M . Also, an R -module M is called a *torsion* if $T(M) = M$ and called *torsion-free* when $T(M) = \{0\}$.

The following theorem says that the contravariant functor $Hom(-, M)$ is a left e -exact functor when M is a *torsion-free* R -module.

Theorem 1. (Akray & Zebari, 2020) Suppose that the following sequence of R -module and R -morphism

$$M_1 \xrightarrow{f_1} M_2 \xrightarrow{f_2} M_3 \rightarrow 0$$

is e -exact. Then for all *torsion-free* R -module M , the sequence

$$0 \longrightarrow Hom(M_3, M) \xrightarrow{f_2^*} Hom(M_2, M) \xrightarrow{f_1^*} Hom(M_1, M)$$

is e -exact. The converse is true if $M_3/Im(f_2)$ and $M_2/Im(f_1)$ are *torsion-free* R -modules.

Definition 1. (Gunduz & Osama, 2022) Let R be a ring and E an R -module. E is said to be e -injective if the following condition is satisfied: For any monic map $f_1: A_1 \rightarrow A_2$ and any map $f_2: A_1 \rightarrow E$, there exist $0 \neq r \in R$ and $f_3: A_2 \rightarrow E$ such that $f_3 f_1 = r \cdot f_2$.

$$\begin{array}{ccc}
 0 & \longrightarrow & A_1 & \xrightarrow{f_1} & A_2 \\
 & & \downarrow f_2 & \nearrow f_3 & \\
 & & E & &
 \end{array}$$

Theorem 2. (Gunduz & Osama 2022) Let R be a ring and E an R -module. Then the following statements are equivalent:

- i) E is an e -injective R -module.
- ii) $Hom(-, E)$ is an e -exact sequence.

Throughout section 2, all modules are assumed to be *torsion-free*. In this section, we introduce the definition of e -homotopy and e -resolution with some theorems such as chain map for e -exact sequence comparing theorem for e -exact sequence.

2. CHARACTERIZATION OF E-HOMOTOPY AND E-RESOLUTION

To define *e-homotopy* and *e-resolution*, recall that some basic definitions. Let $\{K_n\}_{n \in \mathbb{Z}}$ be a family of *R-modules* and $\{d_n: K_n \rightarrow K_{n-1}\}$ a family of *R-homomorphisms*. The family $\{K_n, d_n\}$ is called *chain complex* if $d_n d_{n-1} = 0$ for each n .

We take $\mathbb{K} = \{K_n\}$, $d = \{d_n\}$ and show a chain complexes as follows:

$$(\mathbb{K}, d) : \quad \dots \longrightarrow K_{n+1} \xrightarrow{d_{n+1}} K_n \xrightarrow{d_n} K_{n-1} \longrightarrow \dots$$

We also recall that $H_n(\mathbb{K}, d) = Z_n/B_n$, $n \in \mathbb{N}$ is called *n-th homology module* of K , where $Z_n = \text{Ker}(d_n)$ and $B_n = \text{Im}(d_{n+1})$.

Let (\mathbb{K}, d) and (\mathbb{L}, d') be chain complexes. The sequence $f = \{f_n: K_n \rightarrow L_n\}$ is called a *chain map* if the following diagram is commutative. In words for the diagram

$$\begin{array}{ccccccc} (\mathbb{K}, d) : & \dots & \longrightarrow & K_{n+1} & \xrightarrow{d_{n+1}} & K_n & \xrightarrow{d_n} & K_{n-1} & \longrightarrow & \dots \\ & & & \downarrow f_{n+1} & & \downarrow f_n & & \downarrow f_{n-1} & & \\ (\mathbb{L}, d') : & \dots & \longrightarrow & L_{n+1} & \xrightarrow{d'_{n+1}} & L_n & \xrightarrow{d'_n} & L_{n-1} & \longrightarrow & \dots \end{array}$$

that satisfies $f_{n-1} d_n = d'_n f_n$

For the theory of *e-exact*, we will define $f^* = H_n(f)$ from $H_n(K_n, d_n)$ to $H_n(L_n, d'_n)$ as follows:

Theorem 3. Let (\mathbb{K}, d) and (\mathbb{L}, d') be chain complexes. If $f = \{f_n\}$ is a chain map then it induces *R-module homomorphisms* as follows

$$H_n(f) = f^* = H_n(K_n, d_n) \rightarrow H_n(L_n, d'_n)$$

such that $x + B_n \mapsto f_n(rx) + B'_n$, where $B_n = \text{Im}(d_{n+1})$, $B'_n = \text{Im}(d'_{n+1})$ and for some $0 \neq r \in R$.

Proof. To show f^* is well defined, suppose that $x + B_n = y + B_n$, then $x - y \in B_n$.

Let $x, y \in \text{Ker}(d_n)$ and implies that $x - y \in \text{Ker}(d_n)$. Since $\text{Im}(d_{n+1}) \leq_e \text{Ker}(d_n)$, we have $r(x - y) \in \text{Im}(d_{n+1})$ for some $0 \neq r \in R$. Hence $f_n(r(x - y)) = f_n(r(x) - r(y)) \in B'_n$ and so $f_n(rx) - f_n(ry) \in B'_n$. Therefore $f_n(rx) + B'_n = f_n(ry) + B'_n$ and we get $f_n^*(x) = f_n^*(y)$. Also, it can be seen that f^* is a homomorphism. Let $x + B_n, y + B_n \in H_n(K_n, d_n)$ then $f^*[(x + B_n) + (y + B_n)] = f^*[(x + y) + B_n] = f_n(r(x + y)) + B'_n = f_n(rx + ry) + B'_n = f_n(rx) + f_n(ry) + B'_n = (f_n(rx) + B'_n) + (f_n(ry) + B'_n) = f^*(x + B_n) + f^*(y + B_n)$, as desired.

Definition 2. (E-homotopy). Let (\mathbb{K}, d) and (\mathbb{L}, d') be two chain complexes and $f = \{f, g: K \rightarrow L\}$ be two chain maps as 2.1. If there is a sequence $s = \{s_n\}$ such that $r[f_n - g_n] = d'_{n+1}s_n + r(s_{n-1}d_n)$ for all $n \in \mathbb{Z}$ and for some $0 \neq r \in R$, then f and g are chain e -homotopic which is denoted by $f \simeq_e g$, where $s_n: K_n \rightarrow L_{n+1}$ is an R -module homomorphism that is called a chain e -homotopy.

Lemma 1. The e -homotopy relation “ $f \simeq_e g$ ” is an equivalence relation.

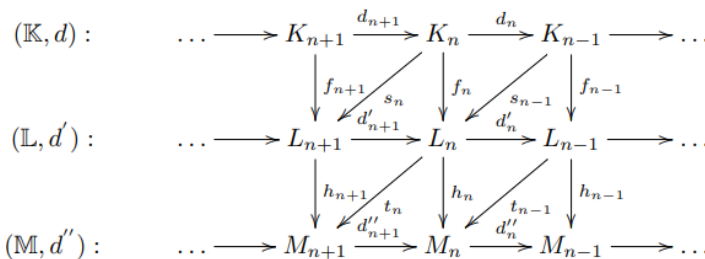
Proof. If we choose $s'_n = -s_n$ for all $n \in \mathbb{Z}$ and for some $0 \neq r \in R$, then $r[f_n - g_n] = d'_{n+1}(-s_n) + r((-s_{n-1})d_n)$ and implies that $r[g_n - f_n] = d'_{n+1}s_n + r(s_{n-1}d_n)$, namely “ $g \simeq_e f$ ” and “ \simeq_e ” is symmetric.

If we choose $s_n = 0, \forall n \in \mathbb{Z}$ and for some $0 \neq r \in R$, then $r[f_n - g_n] = 0$ and implies that “ $f \simeq_e f$ ” and “ \simeq_e ” is reflexive.

To check transitivity, let $f \simeq_e g$ and $g \simeq_e h$. Then for some $0 \neq r_i, r_j \in R$ and $i, j \in \mathbb{I}$ (an index set) there exist $s_n, t_n: K_n \rightarrow L_{n+1}, R$ -module homomorphisms such that we have $r_i[f_n - g_n] = d'_{n+1}s_n + r_i(s_{n-1}d_n)$ and $r_j[g_n - h_n] = d'_{n+1}t_n + r_j(t_{n-1}d_n)$. Define $x_n: K_n \rightarrow L_{n+1}$ homeomorphism such that $x_n = s_n + t_n$. This implies that $r[f_n - h_n] = r(f_n - g_n) + r(g_n - h_n) = d'_{n+1}s_n + d'_{n+1}t_n + r(s_{n-1}d_n) + r(t_{n-1}d_n) = d'_{n+1}(s_n + t_n) + r((s_{n-1} + t_{n-1})d_n) = d'_{n+1}x_n + r(x_{n-1}d_n)$, where for some $0 \neq r = r_i r_j \in R$. Namely “ \simeq_e ” is transitivity. Hence, “ \simeq_e ” is an equivalence relation.

Theorem 4. If “ $f \simeq_e g$ ” and “ $h \simeq_e k$ ”, then “ $hf \simeq_e kg$ ”, where hf is equal $h \circ f$.

Proof. Let $f, g: (\mathbb{K}, d) \rightarrow (\mathbb{L}, d')$ be chain complexes. Then, there exist $s_n: K_n \rightarrow L_{n+1}$ and $t_n: L_n \rightarrow M_{n+1}, R$ -module homomorphisms such that $r_i[f_n - g_n] = d'_{n+1}s_n + r_i(s_{n-1}d_n)$ and $r_j[h_n - k_n] = d''_{n+1}t_n + r_j(t_{n-1}d'_n)$, some $0 \neq r_i, r_j \in R$, where each g_n is defined as $g_n: K_n \rightarrow L_n$.



Define $x_n: K_n \rightarrow M_{n+1}, \forall n \in \mathbb{Z}$ and some $0 \neq r = r_i r_j \in R$ such that $x_n = h_{n+1}s_n + t_n g_n$, then we get $r[h_n f_n - k_n g_n] = r[h_n f_n] - r[h_n g_n] + r[h_n g_n] - r[k_n g_n] = r(h_n[f_n - g_n]) + r((h_n - k_n)g_n) = h_n(r[f_n - g_n]) + r(h_n - k_n)g_n = h_n(d'_{n+1}s_n + r(s_{n-1}d_n)) + (d''_{n+1}t_n + r(t_{n-1}d'_n))g_n = h_n d'_{n+1}s_n + r(h_n s_{n-1}d_n + d''_{n+1}t_n g_n) + r t_{n-1}d'_n g_n = d''_{n+1}[h_{n+1}s_n + t_n g_n] + r(h_n s_{n-1} + t_{n-1}g_{n-1})d_n = d''_{n+1}x_n +$

$r(x_{n-1}d_n)$, as desired. Here $h_n d'_{n+1} = d''_{n+1} h_{n+1}$ and $d'_n g_n = g_{n-1} d_n$ are used by the above diagram. Hence “ $hf \simeq_e kg$ ” and the proof is completed.

Theorem 5. If two chain maps $f, g: K \rightarrow L$ are e – homotopic, then $H_n(f) = H_n(g)$.

Proof. Suppose that $r[f_n - g_n] = d'_{n+1} s_n + r(s_{n-1} d_n)$ for all $0 \neq r \in R$. Let $x + B_n \in H_n(K)$ for $x \in \mathbb{Z}$. Since $d_n(x) = 0$ and $H_n(f) = f^*: H_n(K) \rightarrow H_n(L)$ such that $x + B_n \mapsto f_n(rx) + B'_n$, then $r[f_n - g_n](x) = d'_{n+1} s_n(x) + r(s_{n-1} d_n)(x) = d'_{n+1} s_n(x)$. Since $x \in Ker(d_n)$, $d_n(x) = 0$ and $d'_{n+1} s_n(x) \in B'_n$, we get $r[f_n - g_n](x) = f_n(rx) - g_n(rx) \in B'_n$, which implies $f_n(rx) \in B'_n = g_n(rx) \in B'_n$. Hence $H_n(f)(x + B_n) = H_n(g)(x + B_n)$, and so $H_n(f) = H_n(g)$.

To give the following theorems, recall that Let $(\mathbb{X}, \varepsilon)$ be a left complex over a module A , where

$$\mathbb{X} : \dots \xrightarrow{d_{n+1}} X_n \xrightarrow{d_n} \dots \longrightarrow X_1 \xrightarrow{d_1} X_0 \xrightarrow{d_0} 0$$

and $\varepsilon: X_0 \rightarrow A$ such that $\varepsilon \circ d_1 = 0$.

To get further results, we will give the following definitions.

Definition 3. If the above sequence is e – exact then it is called e – resolution. Moreover if each X_n is an e – projective module then it is called e – projective resolution .

Likewise, recall that let (\mathbb{Y}, δ) be the right complex over a module B , where

$$\mathbb{Y} : 0 \longrightarrow Y^0 \xrightarrow{d^0} Y^1 \xrightarrow{d^1} \dots \xrightarrow{d^{n-1}} Y^n \xrightarrow{d^n} \dots$$

and $\delta: B \rightarrow Y_0$ such that $d_0 \circ \delta = 0$.

Definition 4. If the above sequence is e – exact, then it is called e – resolution. Moreover, if each Y^n is an e – injective module then it is called e – injective resolution.

Under the above new definitions, the following theorem is characterized by comparing theorem for e – exact theory that explains why the above definitions are important.

Theorem 6. Let $(\mathbb{X}, \varepsilon)$ be a left complex over R – module A , (\mathbb{Y}, δ) a left complex over R – module B and $f: A \rightarrow B$ a homomorphism. If each X_n is e – projective and (\mathbb{Y}, δ) is e – resolution, then

$$\begin{array}{ccccccccccccccc}
 \dots & \xrightarrow{d_{n+1}} & X_n & \xrightarrow{d_n} & X_{n-1} & \xrightarrow{d_{n-1}} & \dots & \longrightarrow & X_1 & \xrightarrow{d_1} & X_0 & \xrightarrow{\varepsilon} & A & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow f_n & & \downarrow f_{n-1} & & & & & & \downarrow f_0 & & \downarrow f & & \\
 \dots & \xrightarrow{d'_{n+1}} & Y_n & \xrightarrow{d'_n} & Y_{n-1} & \xrightarrow{d'_{n-1}} & \dots & \longrightarrow & Y_1 & \xrightarrow{d'_1} & Y_0 & \xrightarrow{\delta} & B & \longrightarrow & 0
 \end{array}$$

there exists a chain map $f : \{f\} : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y}$ such that the above diagram is commutative. Moreover, if f' is another chain map that satisfies the same condition, then $f \simeq_e f'$.

Proof. To prove this, we will use induction. Since δ is an epimorphism and X_0 is e -projective, there exists a homomorphism $f_0 : X_0 \rightarrow Y_0$ such that $\delta f_0 = r[f\varepsilon]$, for some $0 \neq r \in R$. Thus, we have the following diagram

$$\begin{array}{ccccc}
 & & X_0 & & \\
 & \swarrow & \downarrow f\varepsilon & & \\
 & & Y_0 & \xrightarrow{\delta} & B \longrightarrow 0
 \end{array}$$

is hold. Now, suppose that f_1, f_2, \dots, f_n are homomorphisms. By hypothesis, we have the following diagram

$$\begin{array}{ccccc}
 & & X_n & & \\
 & \swarrow & \downarrow f_{n-1}d_n & & \\
 & & Y_n & \xrightarrow{d'_n} & Y_{n-1} \longrightarrow 0
 \end{array}$$

such that $d'f_n = r[f_{n-1}d_n]$ for some $0 \neq r \in R$. By the above diagram $d'f_n d_{n+1} = r[f_{n-1}d_n d_{n+1}] = 0$. Since $d_n d_{n+1} = 0$, it implies $f_n d_{n+1} \in \text{Ker}(d'_n)$. Also, since $\text{Im}(d'_{n+1}) \leq_e \text{Ker}(d'_n)$, then $r(f_n d_{n+1}) \in \text{Im}(d'_{n+1})$ for some $0 \neq r \in R$. This implies that there exists $f_{n+1} : X_{n+2} \rightarrow Y_{n+1}$ such that $d'_{n+1}(f_{n+1}) = r f_n d_{n+1}$. Thus we get the following diagram

$$\begin{array}{ccccc}
 & & X_{n+1} & & \\
 & \swarrow & \downarrow f_n d_{n+1} & & \\
 & & Y_{n+1} & \xrightarrow{d'_{n+1}} & \text{Im}(d'_{n+1}) \longrightarrow 0
 \end{array}$$

is hold.

Hence, we can say that there exists an e -projective module X_{n+1} such that the above diagram is commutative.

Now, let $f' = f'_n: X \rightarrow Y$ be another chain map that make the following diagram commutative

$$\begin{array}{ccccccccccccccc}
 \dots & \xrightarrow{d_{n+1}} & X_n & \xrightarrow{d_n} & X_{n-1} & \xrightarrow{d_{n-1}} & \dots & \longrightarrow & X_1 & \xrightarrow{d_1} & X_0 & \xrightarrow{\varepsilon} & A & \longrightarrow & 0 \\
 & & \downarrow f'_n & & \downarrow f'_{n-1} & & & & & & \downarrow f'_0 & & \downarrow f & & \\
 \dots & \xrightarrow{d'_{n+1}} & Y_n & \xrightarrow{d'_n} & Y_{n-1} & \xrightarrow{d'_{n-1}} & \dots & \longrightarrow & Y_1 & \xrightarrow{d'_1} & Y_0 & \xrightarrow{\delta} & B & \longrightarrow & 0
 \end{array}$$

To show $f \simeq_e f'$, we will construct a homomorphism s_n . By induction, let $f'_0 - f_0: X_0 \rightarrow Y_0$ be a homomorphism. Since $\delta(f'_0 - f_0) = \delta f'_0 - \delta f_0 = f\varepsilon - f\varepsilon = 0$, then $f'_0 - f_0 \in \text{Ker}(\delta)$. Since, $\text{Im}(d'_1) \leq_e \text{Ker}(\delta)$, that implies $r(f'_0 - f_0) \in \text{Im}(d'_1)$, for some $0 \neq r \in R$. So there exists an $s_0: X_0 \rightarrow Y_0$ with the commutative diagram

$$\begin{array}{ccc}
 & X_0 & \\
 & \swarrow \text{dotted} & \downarrow f'_0 - f_0 \\
 Y_1 & \xrightarrow{d'_1} & \text{Im}(d'_1) \longrightarrow 0
 \end{array}$$

such that $d'_1 s_0 = r(f'_0 - f_0)$. Since $X_{-1} = 0$, we take $s_{-1} = 0$. So, we get $r[f'_0 - f_0] = d'_1 s_0 + r(s_{-1} d_0)$ for all $n \in \mathbb{Z}$ and for some $0 \neq r \in R$.

Now, suppose that there exist s_0, s_1, \dots, s_n , then the equality

$$\begin{array}{ccc}
 X_1 & \xrightarrow{d_1} & X_0 & \xrightarrow{d_0} & 0 \\
 & & \downarrow & & \\
 Y_1 & \xrightarrow{d'_1} & Y_0 & \xrightarrow{d_1} & 0
 \end{array}$$

$r[f'_n - f_n] = d'_{n+1} s_n + r(s_{n-1} d_n)$ for all $n \in \mathbb{Z}$ and for some $0 \neq r \in R$ is satisfied. Now, we will show that there exists a homomorphism $s_{n+1}: X_{n+1} \rightarrow Y_{n+2}$ such that $r[f'_{n+1} - f_{n+1}] = d'_{n+2} s_{n+1} + r(s_n d_{n+1})$. Namely, it implies that $d'_{n+2} s_{n+1} = r[f'_{n+1} - f_{n+1} - s_n d_{n+1}]$.

Also, $d'_{n+1}(r[f'_{n+1} - f_{n+1} - s_n d_{n+1}]) = r d'_{n+1} f'_{n+1} - r d'_{n+1} f_{n+1} - r d'_{n+1} s_n d_{n+1} = r f'_n d_{n+1} - r f_n d_{n+1} - r d'_{n+1} s_n d_{n+1} = r[f'_n - f_n] d_{n+1} - r d'_{n+1} s_n d_{n+1} = r[d'_{n+1} s_n + r(s_{n-1} d_n)] d_{n+1} - r d'_{n+1} s_n d_{n+1} = r d'_{n+1} s_n d_{n+1} + r s_{n-1} d_n d_{n+1} - r d'_{n+1} s_n d_{n+1} = 0$, since $d_n d_{n+1} = 0$, where $d'_{n+1} f'_{n+1} = f'_n d_{n+1}$ from 2.4 and $d'_{n+1} f_{n+1} = f_n d_{n+1}$ from 2.3. If we take $g = f'_{n+1} - f_{n+1} - s_n d_{n+1}$ then we can see that $d'_{n+1}(g) = 0$. This implies $g \in \text{Ker}(d'_{n+1})$. Since $\text{Im}(d'_{n+2}) \leq_e \text{Ker}(d'_{n+1})$, then $rg \in \text{Im}(d'_{n+2})$, for some $0 \neq r \in R$, it means that, there exists an $s_{n+1}: X_{n+1} \rightarrow Y_{n+2}$ with the following commutative diagram

$$\begin{array}{ccccc}
 & & X_{n+1} & & \\
 & \swarrow & \downarrow g & & \\
 Y_{n+2} & \xrightarrow{d'_{n+2}} & \text{Im}(d'_{n+2}) & \longrightarrow & 0
 \end{array}$$

is hold and such that $r[f'_{n+1} - f_{n+1}] = d'_{n+2}s_{n+1} + r(s_n d_{n+1})$. In conclusion that $f \simeq_e f'$.

Theorem 7. Let $(\mathbb{X}, \varepsilon)$ be a right complex over $R - module A$, (\mathbb{Y}, δ) a right complex over $R - module B$ and $f: A \rightarrow B$ a homomorphism. If each Y^n is $e - injective$ and $(\mathbb{X}, \varepsilon)$ is $e - resolution$, then

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 \longrightarrow & A & \xrightarrow{\varepsilon} & X^0 & \xrightarrow{d^0} & X^1 & \xrightarrow{d^1} \dots & \xrightarrow{d^{n-1}} & X^n & \xrightarrow{d^n} & \dots \\
 & \downarrow f & & \downarrow f^0 & & \downarrow f^1 & & & \downarrow f^n & & \\
 0 \longrightarrow & B & \xrightarrow{\delta} & Y^0 & \xrightarrow{d'^0} & Y^1 & \xrightarrow{d'^1} \dots & \xrightarrow{d'^{n-1}} & Y^n & \xrightarrow{d'^n} & \dots
 \end{array}$$

there exists a chain map $f : \{f\} : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{Y}$ such that the above diagram is commutative. Moreover, if f' is another chain map that satisfies the same condition, then $f \simeq_e f'$.

Proof. The proof can be done as Theorem 6 in similar way.

3. RESULTS AND RECOMMENDATIONS

In this paper, we present some new definitions, theorems and results about e-exact sequences of theory, which is the generalization of exact sequence of module theory, like U-exact sequence theory. Similarly, many results of homological algebra can be obtained for e-exact sequences such as the Lambek lemma, Snake lemma, Connecting homomorphism and Exact triangle for this theory.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study.

REFERENCES

Akray, I., & Zebari, A. (2020). Essential exact sequences. *Communications of the Korean Mathematical Society*, 35(2), 469-480.

Alizade, R., & Pancar, A. (1999). *Homoloji cebire giris*. Ondokuz Mayıs Universitesi Yayınları, Samsun.

Anvariye, S. M., & Davvaz, B. (2005). On quasi-exact sequences. *Bull.Korean Math. Soc.*, 42(1), 149-155.

- Anvariye, S. M., & Davvaz, B. (2002). U-Split-Exact Sequences. *Far East J. Math Sci. (FJMS)*, 4, 2, 2009-219.
- Davaz, B. (2002). A generalization of homological algebra, *J. Korean math. Soc.* 39, no. 6, 881-898.
- Davaz, B. & Parnian-Garameleky, Y. A. (1999). A note on Exact Sequences, *Bull. Malays. Math. Sci. Soc.* (2) 22, no. 1, 53-56.
- Gunduz, A., & Osama, N. A. J. I. (2022). A Note On E-Injective Modules. *Sakarya University Journal of Science*, 26(6), 1262-1266.
- Hungerford, T. W., & Hungerford, T. W. (1974). Categories. *Algebra*, 464-484.
- Tercan, A., & Yücel, C. C. (2016). *Module theory. Extending Modules and Generalizations*, Bassel: Birkhäuser–Springer.



BİLİŞİM SİSTEMİ GELİŞTİRME SÜRECİ BAŞARISINA İNSAN FAKTÖRÜNÜN ETKİSİNİN İNCELENMESİ*

EXAMINING THE EFFECT OF THE HUMAN FACTOR ON THE SUCCESS OF
THE INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT PROCESS

Veysel ŞİMŞEK¹

Vildan ATEŞ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1445819>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
vates@aybu.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
01.03.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
21.04.2024

Kabul Tarihi
(Accepted)
07.05.2024

Öz

Bu çalışmanın amacı insan faktörü ve farklı insan gruplarından oluşan paydaşların (müşteri, proje yöneticisi, proje ekibi ve üst yönetim) bilişim sistemi geliştirme süreci (BSGS) başarısına etkisini ortaya çıkarmaktır. Bu çalışmanın yöntemi nicel araştırma yöntemidir. Bu araştırmanın çalışma grubu 387 kamu kurumlarında çalışan katılımcılardır. Veri toplama aracı üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde katılımcıların demografik bilgilerine yönelik altı soru bulunmaktadır. İkinci bölümde dört alt boyuttan ve 14 sorudan oluşan İnsan Paydaşları Ölçeği (İP-Ö), üçüncü bölümde de altı sorudan oluşan Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği (BSGB-Ö) bulunmaktadır. Veri toplama aracı toplam 26 soru bulunmaktadır. Araştırmanın verileri çevrimiçi veya fiziki olarak 20 Ocak 2023 ve 30 Mart 2023 tarihleri arasında araştırmacının kendisi tarafından toplanmıştır. Verilerin analizinde SPSS 21.0 ve AMOS 22.0 istatistik programları kullanılmıştır. Ölçeğin geçerlik çalışmaları kapsamında açıklayıcı ve doğrulayıcı faktör analizleri; güvenilirlik çalışması kapsamında madde toplam korelasyonu, Cronbach Alpha yöntemleri kullanılmıştır. Analizler sonucunda İP-Ö ve BSGB-Ö ölçeklerinin geçerli ve güvenilir araçlar olduğu görülmüştür. İnsan faktörü BSGS başarısının %28'ini açıklamaktadır. Müşteri ve proje yöneticisinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olmadığı ama üst yönetim ve proje ekibinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olduğu görülmüştür. Çalışma sonucunda kurumlara, yöneticilere ve karar vericilere önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bilişim sistemi, insan faktörü, proje ekibi, üst yönetim.

Abstract

This study aims to investigate the influence of human factors and stakeholders, including customers, project managers, project teams, and senior management, on the success of the information system development process (ISDS). The study employs a quantitative research method and includes participants from 387 public institutions. The data collection tool comprises three parts. The first part includes six questions about the demographic information of the participants. The second part consists of the Human Stakeholder Scale (HS-S), which has four sub-dimensions and 14 questions. The third part includes the Information System Development Process Success Scale (ISDS-S), which has six questions. The data collection tool comprises three parts. In total, there are 26 questions in the tool. The researcher collected the study data online and in person between January 20, 2023, and March 30, 2023. The statistical programs used for data analysis were SPSS 21.0 and AMOS 22.0. The validity studies of the scale included explanatory and confirmatory factor analyses, while the reliability study employed item-total correlation and Cronbach Alpha methods. The analysis revealed that the HS-S and ISDS-S scales are valid and reliable instruments. The human factor accounts for 28% of ISDP success. The study found no statistically significant effect of the customer and project manager on the success of the information system development process but identified a statistically significant effect of top management and the project team. The study resulted in recommendations for institutions, managers, and decision-makers regarding the success of the information system development process.

Keywords: Information system, human factor, project team, top management.

*Bu yayın Veysel Şimşek isimli öğrencinin Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri Anabilim Dalındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim Bilişim Sistemleri ABD, Ankara, Türkiye. v_simssek@hotmail.com, Orcid.org/0000-0002-0046-2622.

² Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, Ankara, Türkiye. vates@aybu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8855-8556.

1. GİRİŞ

Bilişim sistemi bilgiyi toplamak, işlemek, depolamak ve dağıtmak için tasarlanmış resmi, sosyoteknik, örgütsel bir sistemdir. Sosyo teknik bir perspektiften bakıldığında, bilişim sistemleri iş süreçleri, insanlar, yapı (veya roller) ve teknoloji olmak üzere dört temel bileşenden oluşur. Bilişim sistemleri günümüzde her kuruluş için değerli bir varlıktır çünkü veri analitiği yoluyla kârlılığın ve otomasyon yoluyla verimliliğin artmasına yardımcı olabilir. Kurumların tasarruf etmek için görevleri otomatikleştirmelerine olanak tanır. Ayrıca, yöneticilerin işlerindeki veya genel olarak küresel ekonomideki eğilimleri anlayabilmek için merkezi bir veri deposu sağlar. Buna ilaveten işletmelerin piyasadaki değişikliklere yanıt verme süresini hızlandırabilir. Bu nedenle günümüzde her işletmenin veya kurumun var olabilmesi, büyüebilmesi ve kendini geliştirebilmesi için iyi bir bilişim sistemine sahip olması zorunludur.

Bilişim sistemi geliştirme süreci (BSGS) kurum veya kuruluşa katma değer sağlayacak bilişim sisteminin planlama, analiz, tasarım, uygulama, bakım ve idamesini gerçekleştiren süreçtir. Bilişim sistemi geliştirme, bir sistemi analiz etme, yeni bir sistem tasarlama veya eski sistemde değişiklikler yapma, gerekli donanım ve yazılımı edinme ve yeni veya değiştirilmiş sistemi çalıştırmayı da içerir. BSGS'nin arzu edilen amaca ulaşması için organizasyon, insan, süreç, tedarik ve proje yönetimi gibi faktörler ön plana çıkmaktadır. Çünkü bilişim sistemine ihtiyaç duyan kurum sistemin hayata geçirilememesinden dolayı örtülü veya açık maddi ve maddi olmayan maliyetlere katlanmaktadır. BSGS'den kaynaklı bu durum maliyet artışları veya düşük verimlilikte faaliyet göstermeye sebep olabilir ve bu durumda kamu kurumlarında kaynakların etkin kullanılmamasından dolayı toplumun refah seviyesinin düşmesine neden olabilir.

Dünya genelinde ve ülkemizde kamu ve özel sektör ayrımı olmaksızın birçok bilişim projesi çeşitli nedenlerle başarılı olamamaktadır. OASIG 1995 yılındaki raporunda bilişim projelerinin sadece %10 ila %20'sinin başarılı olabildiğini büyük çoğunluğunun ise başarısız olduğunu rapor etmiştir (Pells, 2010). Başarısız projelerin başarısızlık nedenleri incelendiğinde bu projelerin %75'inin iş veya teknolojik amaçlara uygun olmadığı, %85'inin amacına ulaşmadığı, %40'ının başarısız olduğu veya terk edildiği, %80'inin geç teslim edildiği veya bütçesini aştığı söylenebilir (Al-Karaghoulı, 2005). Literatür taraması sonucunda BSGS başarısı için ortaya konulan kritik başarı faktörleri; güçlü ve tecrübeli üst yönetim desteği, projenin hedefi, reel ve uygulanabilir proje takvimi, etkili yönetişim, gerçekçi bütçe yönetimi, tutarlı çalışma planı, risk yönetimi, yeterli insan kaynağı, tecrübe aktarımı, politik tutarlılık, hata payı olarak sıralanabilir (Bryde & Robinson, 2005; Fortune & White, 2006; Pinto & Slevin, 1987; Pinto & Prescott, 1988; Pinto & J.Mantel, 1990; Shenhar & Dvir, 1996; Shenhar ve ark., 2001; Sanjuan & Froese, 2013; Thomas & Fernandez, 2008).

BSGS'de insan faktörünün rolü ortaya konmuş olmasına rağmen yazılım geliştirme ve yazılım mühendisliğindeki araştırmacılar tarafından gerekli önem verilmemiş olup göz ardı edilmiştir. Yazılım mühendisliğindeki araştırmacıların ilgisini çeken çalışma alanları genellikle tasarım mimarisi, programlama dilleri, teknik mühendislik ve yazılımın bakım yoluyla daha etkin kullanımı olarak sıralanabilir (Pirzadeh, 2010).

Bilişim sistemleri hem sosyal hem de teknik sistemleri içinde barındıran disiplindir. Bilişim sistemi geliştirmenin insan odaklı süreç olmasının yanı sıra, bilişim sisteminin

performans ve başarısında insan faktörünün etkisi çok büyüktür. Bu, geliştirme sürecindeki insan kaynağının rolü, müşteri yönüyle yazılımın yani bilgi sistemde kullanılacak uygulamanın veya programın talep ve arz ekonomisini etkilemesi, proje ekibi yönüyle proje geliştirme sürecindeki rolü nedeniyle süreci etkilemesi ve son olarak da yönetici yönüyle projenin istenen şekilde ve zamanda tamamlanmasına yönelik etkisi olması ile açıklanabilir. İnsan faktörünün olduğu bu süreçler psikolojik, yönetsel, bilişsel, sosyolojik ve teknik yönlerden de incelenebilir.

Bu araştırmada bilişim sistemi geliştirme süreci başarısına insan faktörü ve farklı insan gruplarından oluşan paydaşların etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda çalışmanın araştırma soruları (AS) şu şekildedir:

AS1: İnsan Paydaşları Ölçeği (İP-Ö) geçerli ve güvenilir bir araç mıdır?

AS2: Bilişim Sistemleri Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği (BSGB-Ö) geçerli ve güvenilir bir araç mıdır?

AS3: Farklı insan gruplarından oluşan paydaşların bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkisi var mıdır?

AS4: Müşterilerin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkisi var mıdır?

AS5: Proje yöneticisinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkisi var mıdır?

AS6: Proje ekibinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkisi var mıdır?

AS7: Üst yönetimin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkisi var mıdır?

BSGS kritik başarı faktörlerinden en önemli etkenlerden biri olan BSGS etki eden farklı insan gruplarının etkisini araştıran ulusal bir çalışma olmayıp yurt dışında yapılan araştırmalarda da kısıtlı sayıdadır. Bu nedenle, bu çalışma BSGS başarısını etkileyen farklı insan gruplarından oluşan paydaşları ortaya çıkaracağı ve her birinin BSGS başarısına etkisini ortaya koymaya çalışacağı için önemli olup literatürdeki bu boşluğu dolduracağı düşünülmektedir. Ayrıca literatüre İnsan Paydaşları Ölçeği (İP-Ö) ve Bilişim Sistemleri Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği (BSGB-Ö) de kazandıracığı için değerlidir.

Bu çalışma altı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde giriş sunulmuş olup sırasıyla literatür taraması, yöntem, bulgular ile beşinci bölümde de sonuç ve önerilere yer verilmiştir. Son olarak da çalışmada referans verilen kaynaklar yer almaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde yapılan literatür taraması sonuçları sunulmuştur. BSGS kritik başarı faktörlerini inceleyen çalışmalar kronolojik olarak sunulmuş ve BSGS başarısına etki eden farklı insan paydaşları belirlenmiştir.

Viktor ve ark., (2014) yılında Nijerya'nın Rivers eyaletinde bilgi teknolojileri projelerini etkileyen faktörlerin etki değerlendirmesi üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda müşteri ve kullanıcıların etkisinin en üst düzeyde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ihuah ve ark., (2014) da aynı yılda yaptıkları araştırmada Nijerya'da sürdürülebilir sosyal konut için kritik proje yönetimi başarı faktörlerini incelemiştir. Çalışma sonucunda kritik başarı faktörlerinin liderlik, iletişim, takım çalışması, organizasyon ve projenin yapısı olduğu ve proje yöneticilerinin proje başarısı için en önemli faktör olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Fayaz ve ark. Pakistan'da yapılan bilgi teknolojileri projelerinde kritik başarı faktörleri üzerine (2016) araştırma yapmışlardır. Çalışma sonucunda üst yönetim desteği, proje ekibinin yetkinlikleri, etkili ve sürekli iletişimin projelerdeki en önemli kritik başarı faktörleri olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır. Literatürde ilgili yakın tarihli çalışmalar incelendiğinde Hassan ve arkadaşlarının (2018) projelerde kritik başarı faktörleri üzerinde çalışma yapmış ve çıkan sonuçta projede kritik başarı faktörünü etkileyen faktörlerin ilk beşini takım çalışması, iletişim, organizasyon yapısı, projenin doğası ve liderlikten oluştuğunu rapor etmişlerdir. Yasan'ın (2019) proje yönetiminde başarı faktörleri üzerine yaptığı araştırma da görülmektedir. Çalışma sonucunda projelerde başarı kriterini üç gruba ayırmış olup bunları zaman, maliyet ve kalite gibi kısıtların belirlenen hedeflerle karşılanması, proje yönetiminin kalitesi, proje paydaşlarının memnuniyeti olarak belirtmiştir. Aynı yıldaki diğer çalışmada inşaat projelerinde insansız hava araçlarının etkinliğinin başarı faktörleri araştırılmıştır. Buna göre kritik başarı faktörleri iç ve dış faktörler olarak sınıflandırılmıştır. Bu doğrultuda iç faktörler teknoloji, organizasyon, proje ekibi olarak tanımlanmış dış faktörler ise piyasa koşulları, yasal ve çevresel faktörler olarak tanımlanmıştır (Hajj, 2019).

Literatür taraması sonucu BSGS başarısına etki eden farklı insanların müşteri, proje yöneticisi, proje ekibi ve üst yönetim olarak rapor edildikleri görülmüştür. Hangi çalışmalar olduğu ve hangi insan paydaşlarının vurgulandığı Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. BSGS Başarısına Etki Eden Farklı İnsan Paydaşları

| Sıra No | BSGS Başarısına Etki Eden Farklı İnsan Paydaşları | Chow & Cao (2008) | Augustine, ve ark.,(2005) | Lindvall,ve ark. (2004) | CHAOS Report (2015) | Schatz & Abdelsahafi (2005) | Boehm & Turner (2003) | Cadle & Yeates (2008) | Ihuah ve ark., (2014) | Aldahmash (2018) | Pınar ve ark., (2020) | Hidding & Nicholas (2014) | Pinto & Slevin (1987) | Hughes (2022) | Alias ve ark., (2014) | Sanjuan & Froese (2013) | Hassan ve ark., (2018) | Lam ve ark., (2013) | Kır (2007) |
|---------|---|-------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|---------------------|------------|
| 1 | Proje Yöneticisi | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| 2 | Üst Yönetim | X | X | X | X | | | X | | X | | X | X | | | X | X | | X |
| 3 | Proje Ekibi | X | | | X | X | | X | X | | X | | | X | | X | | | |
| 4 | Müşteri | X | X | | | X | | | X | | | X | X | X | | | X | X | |

BSGS kritik insan başarı faktörlerinin etkisini ele alan 18 çalışmaya Tablo 1’de yer verilmiştir. Buna göre farklı insan paydaşları 4 ana başlıkta toplanmış olup bunlar proje yöneticisi, üst yönetici, proje ekibi ve müşterilerdir. En fazla rapor edilen insan grubu 15 ile proje yöneticisi olup onu 11 ile üst yönetim izlemektedir. Müşteri dokuz çalışmada proje ekibi de sekiz çalışmada vurgulandığı Tablo 1’de görülmektedir.

3. YÖNTEM

Çalışmanın bu bölümünde araştırma yöntemi, çalışma grubu, veri toplama aracı, araştırmanın modeli, verilerin toplanması ve verilerin analizine ait süreç ve bilgilere yer verilmiştir.

3.1. Araştırmanın Yöntemi

Bu çalışmanın yöntemi nicel araştırma yöntemidir. Nicel araştırma, deneysel veya deneysel olmayan olayların bilimin ve toplumsal yargılarından bağımsız olarak elde edilen verilerin sayısallaştırılarak tasnif edilmesi, analiz edilmesi ve çıkarım elde edilmesidir. Bu yöntem, geniş veri setlerini analiz etmek ve istatistiksel anlamlılığı belirlemek için çeşitli istatistiksel teknikleri kullanarak, araştırmacılara sayısal verilerle sonuçlar elde etme imkânı sunduğundan tercih edilmiştir. Araştırmanın deseni ise genel tarama modellerinden ilişkisel tarama modelidir. Bu model durumların statik resimlerini sağlamanın yanı sıra farklı değişkenler arasında ilişki kurmayı amaçlayan araştırmalarda kullanılır.

3.2. Çalışma Grubu

Bu çalışmanın çalışma grubuna kolayda ulaşılabilir ve ölçüt örnekleme yöntemleri ile ulaşılmıştır. Kolayda ulaşılabilir örneklemenin tercih edilmesinin nedeni araştırma konularına veya gruplarına katılımı veya bunlara erişimi kolaylaştırdığı için olup çalışma grubu seçimindeki ölçüt ise katılımcıların bilgi işlem biriminde çalışıyor

olmaları ile bir bilişim sistemi geliştirme projesi sürecine katkı vermiş olmalarıdır. Çalışma grubunu bilgi işlem biriminde çalışan kamu kurumları çalışanları ve kamu iştirakleri çalışanlarından oluşan 387 katılımcıdır.

3.3. Veri Toplama Aracı ve Araştırmanın Modeli

Veri toplama aracının geliştirilmesi sürecinin ilk aşamasında kapsamlı bir literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması sonucunda bilişim sistemi geliştirme sürecine etki eden farklı insan grupları ortaya çıkarılmıştır. Bu paydaşların proje yöneticisi (PY), proje ekibi (PE), üst yönetici (Ü) ve müşteri (M) olduğu görülmüştür. İkinci aşamada bu farklı insan gruplarının spesifik olarak incelendiği çalışmalar taranmış ve Tablo 1’de bu 10 çalışmanın künyesi sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde 10 çalışmanın bir bildiri, bir doktora tezi, altı araştırma makalesi ve iki yüksek lisans tezinden oluştuğu görülmektedir.

Tablo 2. Ölçek Maddeleri İçin Yararlanılan Çalışmalar

| Yazarlar ve Yayın Yılı | Yayın Adı | Türü | Ölçek Maddesi |
|---------------------------|---|--------------------|-------------------------------|
| Uluocak, (2014) | Project Success Perception and Critical Success Factors Affecting Project Performance: The Case of Turkish Information Technology Sector | Doktora Tezi | M1, M2, M4, PY6, PY7, Ü2, B10 |
| Stankovic ve ark., (2013) | A Survey Study of Critical Success Factors in Agile Software Projects in Former Yugoslavia IT Companies | Makale | M5, B1, PE4, PY2, B8, B9 |
| Yasan, (2019) | Proje Yönetiminde Başarı Faktörleri: Bir Uygulama | Yüksek Lisans Tezi | B2, B3, B6, |
| Arnaiz ve ark., (2022) | Identifying Critical Success Factors in Continuous Improvement Projects in A Steel Company | Makale | PE2, PE5, PE6 |
| Yavuz, (2018) | The Critical Success Factors for Manufacturing Execution Systems (MES) Adoption in The Defense Industry of Turkey: An Industrial Case Study | Yüksek Lisans Tezi | B7, Ü4 |

| | | | |
|--------------------------|---|-------------------|---------------------|
| Martinez ve ark., (2021) | A Survey Study of Success Factors in Data Science Projects | Tam Metin Bildiri | PY3, PY4, B4 |
| Özgüler ve ark., (2016) | Impact of Personal Characteristics on Project Management | Makale | PE1, PY5, B5 |
| Ceschi ve ark., (2005) | Project Management in Plan-Based and Agile Companies | Makale | PY1, M3 |
| Nasir var ark., (2011) | Critical Success Factors for Software Projects: A Comparative Study | Makale | M6, PE3, PE6, PE8, |
| Chow & Cao, (2008) | A Survey Study of Critical Success Factors In Agile Software Projects | Makale | M4, Ü1, Ü3, Ü5, PE7 |

Ayrıca Tablo 2’de hangi çalışmadan hangi maddelerin esinlenerek hazırlandığı da görülmektedir. 10 çalışmanın yazarları ile e-posta ile iletişime geçilmiş ve çalışmalarında kullanmış oldukları ölçeklerin veya ölçek maddelerinin bu çalışmada kullanılmasına ilişkin izinler alınmıştır.

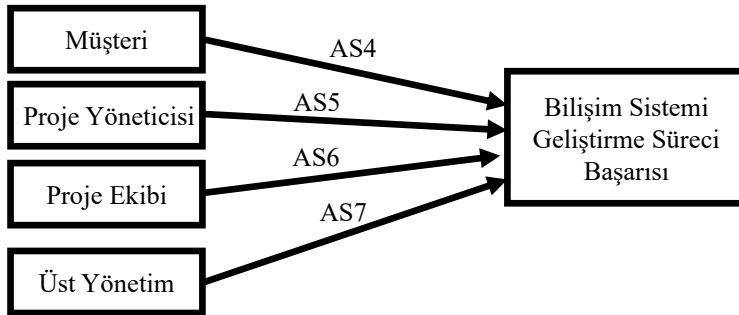
Orijinali İngilizce olan maddelerin dilsel eşdeğerliğini sağlamak için ilk olarak iki alan uzmanı tarafından Türkçeye çevrilmiştir. Türkçeye çevrilen maddeler iki Türk Dili Edebiyatı Bölümü uzmanı tarafından anlaşılabilirlik ve uygunluk açısından kontrolleri yapılmıştır. Taslak maddelerin alana uygunluğu için uzman görüşleri alınmıştır. Elde edilen taslak ölçek maddeleri 10 farklı uzmana gönderilmiş olup uzmanlara ilişkin demografik bilgiler Tablo 3 de görülmektedir.

Tablo 3. Ölçek Maddeleri İçin Görüşü Alınan Uzmanların Demografik Bilgileri

| Cinsiyet | Yaş | Görevi | Hizmet Süresi | Kurumu |
|----------|-----|----------------------|---------------|---------------|
| Erkek | 49 | Daire Başkanı | 25 | Kamu |
| Erkek | 51 | Daire Başkanı | 29 | Kamu |
| Erkek | 38 | Şube Müdürü | 18 | Kamu |
| Erkek | 47 | Şube Müdürü | 23 | Kamu |
| Kadın | 46 | Şube Müdürü | 30 | Kamu |
| Erkek | 42 | Şube Müdürü | 17 | Kamu |
| Erkek | 40 | Bilgisayar Mühendisi | 20 | Kamu |
| Kadın | 35 | Bilgisayar Mühendisi | 16 | Kamu |
| Erkek | 27 | Bilgisayar Mühendisi | 8 | Kamu |
| Erkek | 45 | Direktör | 21 | Kamu İştiraki |

Tablo 3 incelendiğinde yaş ortalamasının 42, hizmet süresinin ise 20.7 yıl olduğu görülmektedir. Ayrıca uzmanların görevleri incelendiğinde altı uzman üst yönetici pozisyonunda üç uzmanda bilgisayar mühendisi olduğu görülmektedir. Yaş, hizmet süresi ve görevleri düşünüldüğünde uzmanların alanda yeterli bilgi ve deneyime sahip oldukları söylenebilir. Uzman görüşleri sonucunda maddelerde gerekli ekleme, çıkarma ve düzeltmeler yapılmıştır. Ölçek maddelerinin son hali araştırmacılar tarafından gerekli kontroller yapılarak verilmiş ve taslak veri toplama aracına ulaşılmıştır.

Veri toplama aracı üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde katılımcıların demografik bilgilerinin elde edilmesine yönelik altı soru (cinsiyet, yaş, eğitim durumu, hizmet süresi, parçası oldukları bilişim sistemi geliştirme proje sayısı, projedeki görevleri) bulunmaktadır. İkinci bölümde ise İnsan Paydaşları Ölçeği (İP-Ö) bulunmaktadır. İP-Ö dört alt boyuttan oluşmaktadır. Bunlar ve soru sayıları sırasıyla üst yönetim (ÜY) beş soru, müşteri (M) altı soru, proje yöneticisi (PY) yedi soru, proje ekibi (PE) sekiz soru şeklindedir. İP-Ö’de toplam 26 soru bulunmaktadır. Üçüncü bölümde 10 sorudan oluşan Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği (BSGB-Ö) yer almaktadır. Veri toplama aracında toplam 45 soru bulunmaktadır. İP-Ö ve BSGB-Ö’de toplam 36 soru bulunmaktadır. Soruların yanıtları 5’li Likert ölçeği ve 1-5 şeklinde (1. Kesinlikle katılmıyorum - 5. Kesinlikle katılıyorum) ölçeklendirilmiştir. Araştırma modeli ve araştırma soru (AS) numaraları Şekil 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Araştırma Modeli

Çalışmanın araştırma modelinde dört tane bağımsız değişken, bir tane bağımlı değişken vardır (Şekil 1). Bağımsız değişkenler İP-Ö’nün dört boyutu olan üst yönetim, müşteri, proje yöneticisi ve proje ekibidir. Bağımlı değişken ise bilişim sistemi geliştirme süreci başarısıdır.

3.4. Veri Toplama Süreci

Verileri toplamadan önce Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Etik Kurulundan veri toplama aracının etik olarak uygun olduğuna dair 18 Ocak 2023 tarih ve 01-03 sayılı Etik Kurul Onayı alınmıştır. Veriler çevrimiçi veya fiziki olarak 20 Ocak 2023 ve 30 Mart 2023 tarihleri arasında araştırmacının kendisi tarafından toplanmıştır. Çevrimiçi olarak araştırmaya katılan katılımcı sayısı 387 olup

190 katılımcı da çıktı halindeki veri toplama aracını yanıtlamış 197 katılımcı ise çevrimiçi olarak veri toplama aracını yanıtlamışlardır. Çevrimiçi veri toplama aracını oluşturmak için Google Forms kullanılmıştır.

3.5. Verilerin Analizi

Katılımcıların her bir ölçeğe verdikleri yanıtlar araştırmacı tarafından Microsoft Excel programına girilmiştir. Analizlerde SPSS 21.0 ve AMOS 22.0 istatistik programları kullanılmıştır. Ölçeğin geçerlik çalışmaları için açıklayıcı ve doğrulayıcı faktör analizleri (DFA) sonuçları değerlendirilmiştir. Ölçeklerin güvenilirliklerini test etmek için de madde toplam korelasyonları ile Cronbach Alpha yöntemleri kullanılmıştır.

Açıklayıcı faktör analizi (AFA) değişken sayılarını azaltarak faktörler arasındaki çoklu bağlantı ve korelasyonu değerlendirmek, bu yapıların tek boyutluluğunu, yapı geçerliliğini değerlendirmek, faktörler ilişkisini inceleyerek yapıların geliştirilmesi ve önerilen teorilerin geçerliliğinin sınanmasıdır (Thompson, 2004). Bu çalışmada, örneklem sayısından elde edilen verilerin yeterli durumu Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) ve Barlett testi ile test edilmiştir. Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) testi için sonucun 0,70'den büyük olması ve Barlett's Küresellik Testi için ise p değerinin 0,05'den küçük olması varsayılmıştır. AFA'da faktör bulmaya yönelik çok sayıda teknik olmasına rağmen bu çalışmada örüntü tanımlama uğraşlarında yaygın kullanıma sahip olan ve bir alt uzay iz düşüm tekniği olan Asal Bileşen Analizi (Temel Bileşen Analizi) tekniği kullanılmıştır. AFA analizleri ile ölçeklerin faktör sayıları belirlendikten sonra doğrulayıcı faktör analizleri ile önceden belirlenmiş olan yapı sınanmıştır. Bu çalışmada geliştirilen iki ölçeğin faktör yapısının orijinal formu ile uyarlanmaya çalışıldığı kültürde tutarlılık gösterip göstermediği DFA analizi ile belirlenmiştir. Ayrıca DFA analizleri ile ölçeklerin yapı geçerliği sınanmıştır.

4. BULGULAR

Bu bölümde sırasıyla katılımcıların demografik bilgilerine ve ölçeklerin geçerlik ve güvenilirlik analizleri bulguları sunulmuştur. Daha sonra ölçeklere ait betimsel istatistikler ile farklı insan gruplarından oluşan paydaşların bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerindeki etkisine ait bulgulara yer verilmiştir.

4.1. Katılımcıların Demografik Özelliklerine Ait Bulgular

Veri toplama aracının birinci bölümünde katılımcılara demografik bilgilerinin elde edilmesine yönelik cinsiyet, yaş, eğitim durumu, hizmet süresi, parçası oldukları bilişim sistemi geliştirme proje sayısı, projedeki görevleri olmak üzere altı soru sorulmuştur. Bu sorulara katılımcıların yanıtları Tablo 4'de özetlenmiştir.

Tablo 4 incelendiğinde 387 katılımcının %70'i erkek, %30'u kadın olup %9,8'i 23-27 yaş, %19,9'u 28-32 yaş, %27,9'u 33-37 yaş, %22'si 38-42 yaş, %15,2'si 43-47 yaş, %5,2'si 48 yaş ve üzeri yaş aralığındadır. Katılımcıların yarısının 28-37 yaş aralığında olduğu söylenebilir. Katılımcıların %57,4'ü lisans, %25,8'i yüksek lisans, %8,3'ü doktora düzeyindedir. Katılımcıların büyük çoğunluğu (%91,5) lisans ve üzeri bir eğitim almıştır. Ayrıca Tablo 4'de katılımcıların bilişim sistemi geliştirme projelerinde

aldıkları rollerde görülmektedir ve ilk üç sırada sistem analisti, proje koordinatörü ve proje ekip üyesi yer almaktadır.

Tablo 4. Katılımcıların Demografik Bilgileri

| Yaş | Sayı | % | Eğitim Durumu | Sayı | % |
|---------------------|-------------|----------|------------------------------------|-------------|----------|
| 23-27 yaş | 38 | 9,8 | Lise | 10 | 2,6 |
| 28-32 yaş | 77 | 19,9 | Ön lisans | 23 | 5,9 |
| 33-37 yaş | 108 | 27,9 | Lisans | 222 | 57,4 |
| 38-42 yaş | 85 | 22 | Yüksek Lisans | 100 | 25,8 |
| 43-47 yaş | 59 | 15,2 | Doktora | 32 | 8,3 |
| 48 yaş ve üstü | 20 | 5,2 | Projedeki Görevleri | Sayı | % |
| Cinsiyet | Sayı | % | Proje Koordinatörü | 76 | 19,6 |
| Kadın | 116 | 30 | Proje Ekip Üyesi | 64 | 16,5 |
| Erkek | 271 | 70 | Sistem Analisti Yazılım Geliştirme | 87 | 22,5 |
| Proje Sayısı | Sayı | % | Ağ Uzmanı | 39 | 10,1 |
| 1-5 | 108 | 27,9 | İş analisti | 34 | 8,8 |
| 6-10 | 71 | 18,3 | Veri Tabanı Tasarımcısı | 23 | 5,9 |
| 11-15 | 79 | 20,4 | Üst Yönetici | 23 | 5,9 |
| 16-20 | 40 | 10,3 | Kurumsal Mimari Uzmanı | 24 | 6,2 |
| 21-25 | 41 | 10,6 | Güvenlik uzmanı | 17 | 4,4 |
| 26-50 | 17 | 4,4 | Toplam Katılımcı Sayısı: 387 | | |
| 51 ve üstü | 31 | 8 | | | |

4.2. İnsan Paydaşları Ölçeğinin Geçerlik ve Güvenirlik Bulguları

İnsan Paydaşları Ölçeği için 387 katılımcıdan toplanan veriler ile SPSS programı kullanılarak açıklayıcı faktör analizi yapılmıştır. AFA sonuçları incelenmiş ve $KMO=0,879$ ve Bartlett Küresellik testi ki-kare istatistiğinin (Barlett's $X^2=5102,112$; $p<0,05$) anlamlı olduğu görülmüştür. Bu sonuç da araştırma örnekleminin yeterli olduğunu göstermektedir. İnsan Paydaşları Ölçeğinin yamaç birikinti grafiği incelendiğinde dördüncü noktadan itibaren eğimin yataya döndüğü görülmüş ve ölçeğin dört boyutlu yapısıyla daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

AFA varimax döndürmesi sonucunda 26 madde ile altı faktörde açıklanan toplam varyans %63,77 düzeyinde olduğu ancak ölçeğin planlanan yapısı 4 boyutlu olduğundan madde boyut ilişkisine uymayan (ait olduğu faktördeki yükü diğer faktördeki yüklerle göre daha düşük olan, faktör yükleri arasındaki farkın 0.10'dan düşük olduğu, ait olduğu faktördeki faktör yükü 0,40'tan düşük olan) maddeler aşamalı olarak ölçekten çıkarılmıştır. Müşteri alt boyutundan M1 ve M3, proje yöneticisinden PY1, PY2, PY6, PY7 ve proje ekibinden PE1, PE2, PE7, PE8 ile üst yönetimden ÜY2, ÜY5 olmak üzere 12 madde toplamda çıkarılmış ve Tablo 5'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5. İnsan Paydaşları Ölçeği AFA ve Güvenirlik Bulguları

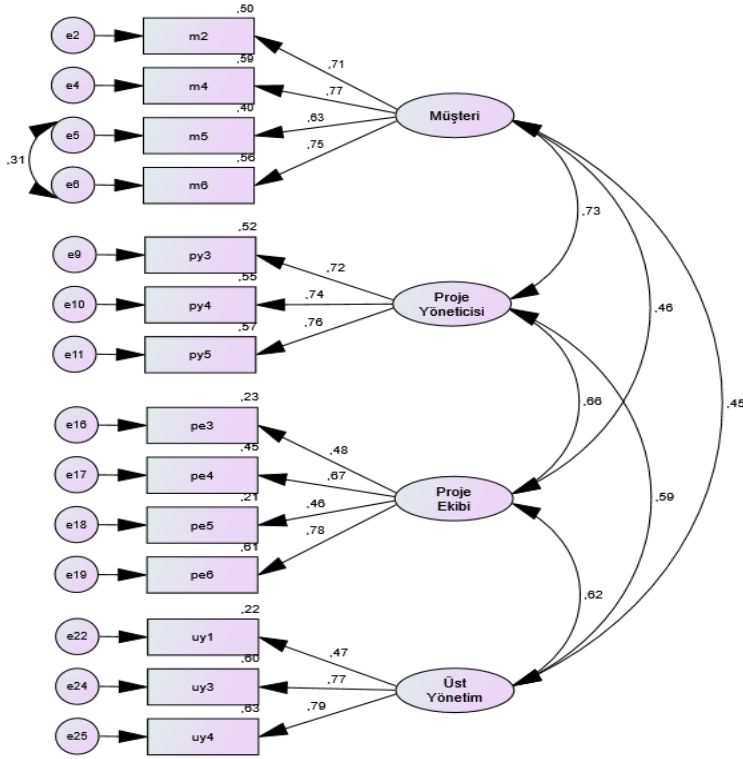
| Boyut Adı ve Madde No | 1 | 2 | 3 | 4 | r |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Müşteri | | | | | |
| M2 | 0,714 | | | | 0,486 |
| M4 | 0,642 | | | | 0,610 |
| M5 | 0,831 | | | | 0,534 |
| M6 | 0,799 | | | | 0,630 |
| Proje Yöneticisi | | | | | |
| PY3 | | 0,782 | | | 0,572 |
| PY4 | | 0,719 | | | 0,607 |
| PY5 | | 0,673 | | | 0,615 |
| Proje Ekibi | | | | | |
| PE3 | | | 0,726 | | 0,321 |
| PE4 | | | 0,686 | | 0,517 |
| PE5 | | | 0,634 | | 0,265 |
| PE6 | | | 0,678 | | 0,570 |
| Üst Yönetim | | | | | |
| ÜY1 | | | | 0,824 | 0,302 |
| ÜY3 | | | | 0,668 | 0,505 |
| ÜY4 | | | | 0,714 | 0,548 |
| Özdeğer | 5,079 | 1,744 | 1,233 | 1,009 | |
| Varyans (%) | 18,662 | 17,506 | 15,480 | 13,109 | |
| Toplam Varyans (%) | 64,757 | | | | |
| Cronbach Alpha (α) | 0,823 | 0,786 | 0,681 | 0,703 | |
| Cronbach Alpha (α) (İP-Ö) | 0,855 | | | | |

r: Madde toplam korelasyonu

Ölçekte sorunlu maddeler çıkarılarak tekrarlanan AFA sonucunda kalan 14 madde ile 4 faktörde açıklanan toplam varyans %64,76 düzeyine ulaşmıştır. Son aşamada 4 boyut ve 14 madde ile elde edilen toplam varyansın başlangıçtaki 26 madde ve 6 boyut ile elde edilen toplam varyansın (%63,76) daha yüksek olduğu görülmüştür. Madde faktör yükleri incelendiğinde ait olduğu boyuttaki faktör yükü 0,40'tan düşük madde olmadığı, birden fazla boyuttaki faktör yükleri arasındaki farkın da 0,10'dan yüksek olduğu tespit edilmiştir. Güvenirlik analiz incelendiğinde madde toplam korelasyonlarının 0,30'dan yüksek olduğu; İP-Ö'nin geneline ait Cronbach Alpha iç güvenirlik katsayısı 0,85; alt boyutların Cronbach Alpha iç güvenirlik katsayılarının sırasıyla 0,82; 0,79; 0,68; 0,70 düzeyinde olduğu tespit edilmiştir.

İP-Ö'nün 14 madde ve 4 boyutlu yapısı için doğrulayıcı faktör analizi gerçekleştirilmiştir. İnsan Paydaşları Ölçeğinin doğrulayıcı faktör analizinden elde edilen katsayıları, katsayılara ait t değerlerine Şekil 2 ve Tablo 5'te yer verilmiştir. İlk olarak t değerlerinin anlamlılık düzeyleri ve hata varyansları incelenmiştir. Her bir maddenin t değerleri 1,96'yı aşarsa 0,05 düzeyinde ve 2,56'yı aşarsa 0,01 düzeyinde manidar olup hata varyanslarının 0,90'dan düşük olması gerekmektedir (Çokluk, Şekercioğlu ve Büyüköztürk, 2010). Tablo 5 incelendiğinde ise her bir maddeye ait t değerlerinin 0,01 düzeyinde anlamlı olduğu görülmektedir. Şekil 2'ye göre de hata varyansları 0,22 ile 0,63 arasında olduğu tespit edilmiştir. İncelenen bir diğer değer de

faktör yükleri olup maddelerin faktör yüklerinin 0,46 ile 0,79 arasında değiştiği Şekil 2 ve Tablo 6'da görülmektedir.



Şekil 2. İnsan Paydaşları Ölçeği İçin Yol Analizi

Tablo 6. İnsan Paydaşları Ölçeği DFA Bulguları

| Eski kodu | Yeni numara | Madde | Faktör Yükleri | t |
|-------------------------|-------------|--|----------------|---------|
| Müşteri | | | | |
| M2 | 1 | Müşterilere görüşlerinin proje planına dâhil edilip/edilmedikleri konusunda bilgi verilmesi bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarıya ulaşması için gereklidir. | 0,71 | 13,36** |
| M4 | 2 | Proje yönetiminin müşteriyle iyi ilişkilere sahip olması bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,77 | 12,65** |
| M5 | 3 | Müşterilerin, proje gereksinimlerini ve değişikliklerini onaylama ve önceliklendirme gibi kararlar alma konusunda yetkiye sahip olması bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,63 | 10,54** |
| M6 | 4 | Müşteri katılımına gerekli özenin gösterilmesi bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,75 | 12,32** |
| Proje Yöneticisi | | | | |
| PY3 | 5 | Proje yöneticisinin ekip içi işbirliği ve koordinasyona önem vermesi bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,72 | 11,65** |
| PY4 | 6 | Proje yöneticisinin proaktif ekip iletişimi ortamı sağlaması bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,74 | 12,86** |
| PY5 | 7 | Proje yöneticisinin proje planlarında yer alacak tüm çalışanların görev ve sorumluluklarının açıkça belirtmesi bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,76 | 13,03** |
| Proje Ekibi | | | | |
| PE3 | 8 | Proje ekibinin tutarlı, kendi kendini organize eden bir ekip çalışması tarzında çalışması bilişim sistemi geliştirme süreci başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,48 | 5,86** |
| PE4 | 9 | Proje ekibinin motivasyona sahip olması ve kendilerini proje başarısına adanmaları bilişim sistemi geliştirme süreci başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,67 | 7,95** |
| PE5 | 10 | Proje ekibinin içerisinde tüm paydaşlardan temsilcilerin bulunması bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,46 | 6,46** |

| | | | | |
|-------------|----|---|------|--------|
| PE6 | 11 | Proje ekibinin tecrübelerinden faydalanması bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,78 | 8,29** |
| Üst Yönetim | | | | |
| ÜY1 | 12 | Üst yönetimin informal olarak bilişim sistemi geliştirme sürecini desteklemeleri bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,47 | 7,85** |
| ÜY3 | 13 | Bilişim sistemi geliştirme sürecindeki bir kriz anını üst yöneticilerin desteklemesi bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı için gereklidir. | 0,77 | 8,24** |
| ÜY4 | 14 | Bilişim sistemi geliştirme sürecinin güçlü üst yönetim desteği alması başarısını olumlu yönde etkiler. | 0,79 | 8,25** |

Tablo 5’de İP-Ö’nün son hali ve maddeleri görülmektedir. DFA analizi sonrası elde edilen İP-Ö ölçeğine ait uyum indeksleri de Tablo 7’de yer almaktadır.

Tablo 7. İP-Ö DFA Sonucu Elde Edilen Model Uyum İndeksleri

| Model Uyum İndeksleri | İyi Uyum İçin Referans Değerleri ¹ | Değer |
|---------------------------|---|-----------|
| X2/sd | < 5 | 2,949 |
| RMSEA | ≤0,10 | 0,071 |
| SRMR | ≤0,08 | 0,052 |
| GFI | ≥0,90 | 0,933 |
| NNFI | ≥0,90 | 0,907 |
| CFI | ≥0,90 | 0,929 |
| Faktör yükü | | 0,46/0,79 |
| Kovaryans bağlantı sayısı | | m5-m6 |

¹: Çokluk, Şekercioğlu ve Büyüköztürk, 2010

*Kovaryans bağlantıları yapıldı.

DFA analizi sonrası elde edilen uyum indeksleri Tablo 7’de görülmektedir. Tablo 7 incelendiğinde uyum indekslerinin iyi uyum düzeyi referans değerlerine sahip oldukları ve yalnızca bir kovaryans bağlantısı yapıldığı görülmektedir. Sonuç olarak araştırma sorusu 1 (AS1) yanıtlanmış olup İnsan Paydaşları Ölçeğinin geçerli ve güvenilir bir araç olduğu söylenebilir.

4.3. Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeğinin Geçerlik ve Güvenirlik Bulguları

Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği için ilk olarak AFA gerçekleştirilmiştir. Faktör analizi sonuçları yorumlanmadan önce BSGB-Ö için ulaşılan 387 katılımcı sayısının uygunluğu kontrol edilmiştir. Kontrol için incelenen KMO=0,867 ve Bartlett Küresellik testi ki-kare istatistiğinin (Barlett’s X2=1 591,33; p<0,05) istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Buradan araştırmadaki örneklem büyüklüğünün analiz için yeterli sayıda olduğu sonucuna varılmıştır.

İlk AFA analizi varimax döndürmesi sonucunda 10 madde ile iki faktörde açıklanan toplam varyansın %58,68 düzeyinde olduğu görülmüştür. Ancak ölçeğin planlanan yapısı tek boyutlu olduğundan madde boyutu ilişkisine uymayan (ait olduğu faktördeki yükü diğer faktördeki yüklere göre daha düşük olan, faktör yükleri arasındaki farkın 0,10'dan düşük olduğu, ait olduğu faktördeki faktör yükü 0,40'tan düşük olan) maddeler aşamalı olarak ölçekten (B1, B2, B3, B4) çıkarılmıştır. AFA analizi tekrarlanmış ve Tablo 8'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 8. BSGB-Ö AFA ve Güvenirlilik Bulguları

| Madde No | Faktör Yükleri | r |
|-----------------------------|----------------|-------|
| B5 | 0,598 | 0,457 |
| B6 | 0,750 | 0,575 |
| B7 | 0,726 | 0,594 |
| B8 | 0,739 | 0,587 |
| B9 | 0,782 | 0,627 |
| B10 | 0,785 | 0,648 |
| Özdeğer | 3,178 | |
| Varyans (%) | 52,964 | |
| Cronbach Alpha (α) | 0,811 | |

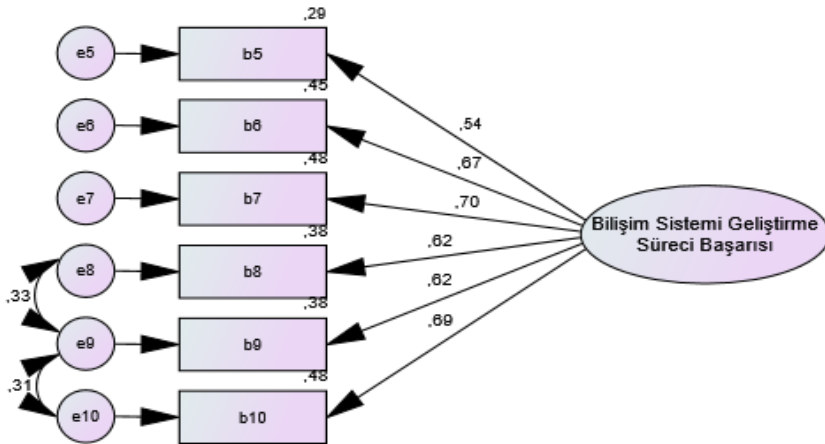
r: Madde toplam korelasyonu

AFA sonucunda kalan 6 madde ile tek faktörde açıklanan toplam varyans %52,96 olup faktör yükleri incelendiğinde ait olduğu boyuttaki faktör yükü 0,40'tan düşük madde olmadığı tespit edilmiştir. Güvenirlilik analizi incelendiğinde madde toplam korelasyonlarının 0,30'dan yüksek olduğu; ölçeğin geneline ait Cronbach Alpha katsayısı 0,81 düzeyinde olduğu Tablo 8'de görülmektedir.

BSGB-Ö'nün yapı geçerliğini test etmek için DFA analizi gerçekleştirilmiştir. BSGB-Ö'nün doğrulayıcı faktör analizinden elde edilen katsayıları, katsayılar ait t değerlerine Şekil 3 ve Tablo 9'da yer verilmiştir. İlk olarak t değerlerinin anlamlılık düzeyleri ve hata varyansları kontrol edilmiştir. Tablo 8 incelendiğinde ise her bir maddeye ait t değerlerinin 12,5 ila 20,48 arasında değiştiği ve bu değerlerin 0,01 düzeyinde anlamlı olduğu söylenebilir. Şekil 3'e göre de hata varyansları 0,29 ile 0,48 arasında olduğu görülmektedir. İncelenen bir diğer değer de faktör yükleri olup maddelerin faktör yüklerinin 0,54 ile 0,70 arasında değiştiği Şekil 3 ve Tablo 9'da görülmektedir.

Tablo 9. BSGB-Ö DFA Analizi Sonuçları

| Eski Numarası | Yeni No | Madde | Faktör Yükleri | t |
|---------------|---------|---|----------------|---------|
| B5 | 1 | Bilişim sistemi çıktılarında üst yönetimin memnun olması bilişim sistemi geliştirme süreci başarısının bir göstergesidir. | 0,54 | 12,5** |
| B6 | 2 | Bilişim sisteminin kurum kültürüne uygun olması başarılı bir sistem geliştirme sürecinin sonucudur. | 0,67 | 20,48** |
| B7 | 3 | Bilişim sisteminin kuruma rekabet avantajı sağlaması bilişim sistemi geliştirme süreci başarısının bir göstergesidir. | 0,70 | 16,00** |
| B8 | 4 | Müşterilerin sistemden memnun olması başarılı bir sistem geliştirme sürecinin sonucudur. | 0,62 | 13,95** |
| B9 | 5 | Bilişim sisteminin işletmeye net fayda sağlaması başarılı bir sistem geliştirme sürecinin sonucudur. | 0,62 | 13,45** |
| B10 | 6 | Bilişim sisteminin ilgili ihtiyacın/problemin çözümü yönünden en ideal çözümü sunması başarılı bir sistem geliştirme sürecinin sonucudur. | 0,69 | 14,57** |



Şekil 3. Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği Yol Analizi

BSGB-Ö'de yer alan maddelerin ait oldukları boyutlardaki faktör yüklerinin 0.40'tan yüksek (Tablo 9, Şekil 3) ve tüm maddelerin t değerlerinin anlamlı olduğu ($p < 0,01$) görülmektedir. Hata varyansları da 0,90'dan küçük olup 0,29 ile 0,49 arasındadır. Daha sonra BSGB-Ö'nün doğrulanıp doğrulanmadığını kontrol etmek için DFA sonucu elde edilen model uyum indeksleri incelenmiş ve Tablo 10'da sunulmuştur.

Tablo 10. BSGB-Ö DFA Sonucu Elde Edilen Model Uyum İndeksleri

| Model Uyum İndeksleri | İyi Uyum Referans Değerler ¹ | Modifikasyon Öncesi Uyum İndeks Değerleri | Modifikasyon Sonrası Model Uyum İndeks değerleri |
|------------------------|---|---|--|
| X ² /sd | < 5 | 6,762 | 2,412 |
| RMSEA | ≤0,10 | 0,122 | 0,060 |
| SRMR | ≤0,08 | 0,047 | 0,023 |
| GFI | ≥0,90 | 0,951 | 0,986 |
| NNFI | ≥0,90 | 0,882 | 0,971 |
| CFI | ≥0,90 | 0,929 | 0,986 |
| Faktör yükleri aralığı | ≥0,40 | 0,49-0,76 | 0,54- 0,70 |
| Kovaryans bağlantıları | | | B8-B9, B9-B10 |

¹ Çokluk, Şekercioğlu ve Büyükoztürk, 2010

Tablo 10'da görüldüğü gibi model uyum indekslerinin uygun düzeylere ulaşması için kovaryans bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Modifikasyon önerilerine uygun iki kovaryans bağlantısı (B8-B9, B9-B10) sonucunda model uyum indekslerinin çok iyi düzeylere ulaştığı Tablo 10'da görülmektedir.

Açıklayıcı faktör analizi, doğrulayıcı faktör analizi, madde toplam korelasyonu ve Cronbach Alpha katsayılarından oluşan geçerlik ve güvenilirlik bulgularına göre BSGB-Ö altı madde ve bir boyutlu yapısı ile geçerli ve güvenilir bir ölçek olduğu söylenilebilir. Araştırmanın ikinci araştırma sorusu da yanıtlanmıştır.

4.4. Ölçeklere Ait Betimsel İstatistikler

Tablo 11'de İP-Ö ve BSGB-Ö'nün toplam ve alt boyut puanlarına ait betimsel istatistiklere (Minimum (Min), Maksimum (Mak), Ortalama (\bar{X}), Standard Sapma (SS), Çarpıklık (Ç) ve Basıklık (B)) yer verilmiştir.

Tablo 11. Ölçeklere Ait Betimsel İstatistikler

| Ölçekler ve Alt Boyutları | N | Min | Mak | \bar{X} | SS | Ç | B |
|---|-----|------|------|-----------|------|-------|-------|
| Müşteri | 387 | 1,00 | 5,00 | 4,04 | 0,76 | -0,39 | -0,12 |
| Proje Yöneticisi | 387 | 2,00 | 5,00 | 4,38 | 0,64 | -0,73 | 0,07 |
| Proje Ekibi | 387 | 2,25 | 5,00 | 4,41 | 0,51 | -0,51 | 0,12 |
| Üst Yönetim | 387 | 2,00 | 5,00 | 4,52 | 0,53 | -0,98 | 0,97 |
| İnsan Paydaşları Ölçeği | 387 | 2,81 | 5,00 | 4,34 | 0,46 | -0,61 | 0,41 |
| Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Ölçeği | 387 | 1,00 | 5,00 | 4,34 | 0,56 | -0,25 | 0,21 |

İnsan paydaşları ölçeği toplam puan ortalaması $4,34 \pm 0,46$ olarak tespit edilmiş olup ölçekten alınabilecek en düşük (1) ve en yüksek (5) puanlara göre katılımcıların insan paydaşları puanı yüksek düzeydedir. İnsan paydaşlarında en yüksek öneme sahip boyutlar sırasıyla üst yönetim ($4,52 \pm 0,53$), proje ekibi ($4,41 \pm 0,51$), proje yöneticisi ($4,37 \pm 0,64$) olarak tespit edilmiş olup yine yüksek puana sahip olmakla birlikte en düşük öneme sahip boyut müşteri ($4,04 \pm 0,76$) olarak tespit edilmiştir.

Bilişim sistemi geliştirme süreci ölçeği toplam puan ortalaması $4,34 \pm 0,56$ olarak tespit edilmiş olup ölçekten alınabilecek en düşük (1) ve en yüksek (5) puanlara göre bilişim sistemi geliştirme süreci başarısına ilişkin puanlarının da yüksek düzeyde olduğu söylenebilir.

4.5. İnsan Paydaşları ile Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Arasındaki İlişkiye Ait Bulgular

Tablo 12’de insan paydaşları ile bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı puanları arasındaki Pearson korelasyon analizi sonuçlarına yer verilmiştir.

Tablo 12. İP ile BSGB Puanları Arasındaki İlişki

| Ölçek ve Alt Boyutları | Sembol | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|--------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Müşteri | 1 | 1 | 0,56** | 0,34** | 0,38** | 0,80** | 0,27** |
| Proje Yöneticisi | 2 | | 1 | 0,47** | 0,44** | 0,83** | 0,30** |
| Proje Ekibi | 3 | | | 1 | 0,43** | 0,68** | 0,42** |
| Üst Yönetim | 4 | | | | 1 | 0,70** | 0,47** |
| İnsan Paydaşları | 5 | | | | | 1 | 0,45** |
| Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı | 6 | | | | | | 1 |

* $p < 0,05$

* $p < 0,01$

Tablo 12’e göre insan paydaşları ölçeğinde yer alan müşteri ($r=0,27$; $p < 0,05$), proje yöneticisi ($r=0,30$; $p < 0,05$), proje ekibi ($r=0,42$; $p < 0,05$), üst yönetim ($r=0,47$; $p < 0,05$) alt boyut puanları ve insan paydaşları ölçek puanı ($r=0,45$; $p < 0,05$) ile bilişim sistemi geliştirme süreci başarı puanı arasında pozitif yönlü ve anlamlı ilişki olduğu tespit edilmiştir.

4.6. Farklı İnsan Gruplarından Oluşan Paydaşların Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Üzerindeki Etkisine Ait Bulgular

Çalışmanın araştırma modeli Yöntem bölümünde Şekil 1’de verilmiştir. Bu bölümde çalışmanın araştırma sorularına (AS3, AS4, AS5, AS6, AS7) yanıtlar araştırılacaktır. Araştırma soruları için çoklu regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Tablo 13’de

araştırma modeline ilişkin çoklu regresyon analizi ve araştırma sorularının cevaplarına yer verilmiştir.

Tablo 13. İnsan Paydaşlarının Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı Üzerindeki Etkisi

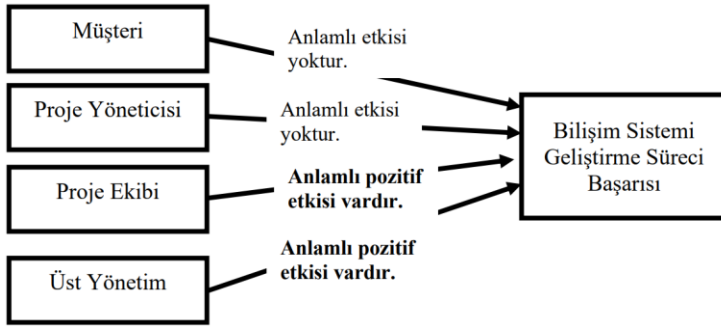
| Bağımsız Değişken | AS | B | SH | β | t | P |
|-------------------|-----|--------------------|-----------------------|-------------|---------------------|--------------|
| Sabit | | 0,763 | 0,104 | | 7,358 | 0 |
| Müşteri | AS4 | 0,065 | 0,062 | 0,055 | 1,04 | 0,299 |
| Proje Yöneticisi | AS5 | 0,003 | 0,075 | 0,002 | 0,036 | 0,971 |
| Proje Ekibi | AS6 | 0,411 | 0,081 | 0,26 | 5,081 | 0,000 |
| Üst Yönetim | AS7 | 0,52 | 0,078 | 0,34 | 6,684 | 0,000 |
| $R^2=0,285$ | | $\Delta R^2=0,277$ | $F_{(4; 382)}=38,012$ | $p=0,000$ | Cohen's $f^2=0,399$ | |

*: $p<0,05$ **: $p<0,01$ AS: Araştırma sorusu

Tablo 13'de elde edilen bulgulara göre farklı insan paydaşlarından oluşan gruplar olan müşteri, PY, PE ve ÜY'nin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerindeki etkisini gösteren modelin uygun olduğu ($F_{(1; 358)}=151,25$; $p<0,05$) ve bu grupların bilişim sistemi geliştirme süreci başarısındaki değişimin yaklaşık %28'ini ($\Delta R^2=0,277$) açıkladığı görülmüştür. Elde edilen R^2 istatistiğinden hesaplanan ($R^2 / (1-R^2)$) Cohen's f^2 etki büyüklüğü yaklaşık olarak 0,40 olarak hesaplanmış olup insan paydaşlarının bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerindeki etkisi "büyük etki" ($f^2=0,399$) düzeyindedir.

Regresyon katsayısı (β) ve katsayının anlamlılığına ilişkin t istatistiği incelendiğinde müşterilerin ($\beta=0,055$; $t=1,040$; $p>0,05$) bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde anlamlı etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. Aynı şekilde regresyon katsayısı (β) ve katsayının anlamlılığına ilişkin t istatistiği incelendiğinde proje yöneticisinin de ($\beta=0,002$; $t=0,036$; $p>0,05$) bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Buna göre müşterilerin ve proje yöneticisinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olmadığı söylenebilir.

Regresyon katsayısı (β) ve katsayının anlamlılığına ilişkin t istatistiği incelendiğinde proje ekibi ($\beta=0,26$; $t=5,08$; $p<0,05$) bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde pozitif yönlü ve anlamlı etkiye sahip olduğu görülmüştür. Üst yöneticilerin analiz sonucundaki regresyon katsayısı (β) ve katsayının anlamlılığına ilişkin t istatistiği incelendiğinde üst yönetim ($\beta=0,34$; $t=6,68$; $p<0,05$) bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahiptir. Sonuç olarak üst yönetim ve proje ekibi bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Araştırma Modeli ve Araştırma Sonuçları

Araştırma modeli ve araştırma sonuçlarına ilişkin sonuçlar Şekil 4’de gösterilmiştir

Tablo 13’e göre regresyon modeli aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\text{Bilişim Sistemi Geliştirme Süreci Başarısı} = 0,76 + 0,52\text{ÜstYönetim} + 0,41\text{ProjeEkibi}$$

Modelde de görüldüğü gibi üst yönetim ve proje ekibi ile bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı arasında anlamlı ilişkiler saptanmıştır. Söz konusu iki değişken birlikte bilişim sistemi geliştirme süreci başarısının %28 kadarını yordadığı görülmüştür (Tablo 13). Üst yönetimin proje ekibinden daha fazla bilişim sistemi geliştirme süreci başarısını arttırdığı söylenebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bilişim sistemi geliştirme süreci başarısına insan faktörü ve farklı insan gruplarından oluşan paydaşlardan müşteri, proje yöneticisi, proje ekibi ve üst yönetimin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada dört boyuttan oluşan İnsan Paydaşları Ölçeği ve Bilişim Sistemleri Geliştirme Süreci Başarısı olmak üzere iki ölçek kullanılmıştır. İlk olarak ölçeklerin geçerli ve güvenilir araçlar olup olmadığı kontrol edilmiştir. Açıklayıcı ve doğrulayıcı faktör analizleri sonucu İP-Ö ve BSGB-Ö’nin geçerli ve güvenilir araçlar olduğu görülmüştür. Bilişim sistemi geliştirme süreci başarısına insan faktörü ve farklı insan gruplarından oluşan paydaşlar olan müşteri, proje yöneticisi, proje ekibi ve üst yönetimin etkilerini araştırmak için çoklu regresyon analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda insan faktörünün bilişim sistemi geliştirme süreci başarısının %28’ini açıkladığı görülmüştür. Müşteri ve proje yöneticisinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olmadığı görülmüştür. Diğer taraftan üst yönetim ve proje ekibi bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olduğu görülmüştür.

Bilişim sistemleri projelerinin başarısında üst yönetimin rolü, bir takım önemli sorumlulukları içermektedir. İlk olarak yönetim, projenin temel hedefleri ve kurumun genel stratejik vizyonuyla tutarlı bir tahmin oluşturmalıdır. Bu, proje hedeflerini tanımlamayı, kilometre taşlarını belirlemeyi ve başarıyı ölçmek için bir çerçeve

oluşturmayı içerir. Ayrıca, bilişim sistemleri projesi genellikle yüksek bütçeli ve kaynak gerektiren projeler olduğundan, yöneticilerin bütçelerini ve kaynaklarını etkin bir şekilde yönetmeleri gerekebilir. Bu, proje finansmanını güvence altına almak, kaynakları gerektiği gibi tahsis etmek ve projenin finansal başarısının devamını sağlamak için stratejik planlamayı da içerebilir. Ayrıca yöneticilerin paydaşlarla etkin iletişim kurması ve onların beklentilerini dikkate alması gerekmektedir. Bu, bilişim sistemi geliştirme süresince düzenli güncellemeleri, olası değişikliklere esnek adaptasyonu ve ilgili kişiler arasındaki koordinasyonun desteklenmesini içerir. Yönetimin bir diğer görevi de bilişim sistemi geliştirme sürecinde ortaya çıkabilecek riskleri belirlemek ve değerlendirmektir. Bu, potansiyel tehditlere karşı stratejiler geliştirmek, proje esnekliğini artırmak ve beklenmedik sorunlara hazırlanmak anlamına gelir.

Üst yönetim bir projeyi desteklediğinde, projenin geliştirilmesinde yer alan kişilere olumlu bir sinyal iletilir ve bu da onların performanslarını olumlu yönde etkiler. Bu çalışma sonucundaki aynı paralel sonuca literatürde de rastlanmaktadır (Ahmed, Mohamad & Ahmad, 2016; Augustine ve ark., 2005; Chow & Cao, 2008; Hassan ve ark., 2018; Hughes, 2022; Ihuah ve ark., 2014; Kır, 2007; Lindvall ve ark., 2004; Pınar ve ark., 2020; Pinto & Slevin, 1987; Sanjuan & Froese, 2013). Ayrıca Zwikael (2008) çalışması sonucunda bilişim sektöründeki yöneticilerin çoğunluğunun kurumsal konuların teknik konulardan daha önemli olduğunu algıladıklarına da dikkat çekmiştir (Zwikael, 2008). Buna ilaveten bilişim sistemi geliştirme süreci ile alakalı literatürde en çok vurgu yapılan kritik başarı faktörü “üst yönetim desteği”dir (Fortune & White, 2006).

Üst yöneticiler aynı zamanda bilişim sistemi geliştirme sürecinde çalışan ekiplere etkin bir şekilde liderlik etmeli, motivasyonu artırmalı ve ekiplerin potansiyellerini en üst düzeye çıkaracak şekilde gelişimlerine katkıda bulunmalıdır. Ayrıca projenin teknik gerekliliklerine uygunluğu sağlamak ve sektördeki yeniliklere ayak uydurmak için teknolojik gelişmelere ayak uydurmaları gerekmektedir. Bu, gelecekteki bilişim projelerinde daha iyi sonuçlar elde etmek için devam eden çabaları desteklemektedir. Tüm bu sorumluluklar bir araya getirildiğinde bilişim sistemleri geliştirme süreci başarısında yöneticilerin oynayacağı merkezi rol, projeyi stratejik hedefler doğrultusunda yönetmek, kaynakları verimli kullanmak ve ekip dinamiğinin projenin başarısına olumlu katkıda bulunmasını sağlamak olabilir.

Bu çalışmanın sonuçlarından bir diğeri de proje ekibinin bilişim sistemi geliştirme süreci başarısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkilerinin olduğudur. Proje ekibinin etkili olduğuna dair literatürdeki çalışmalar Cadle & Yeates (2008), Chow & Cao (2008), Hughes (2022), Ihuah ve ark., (2014), Sanjuan & Froese (2013) ile Pınar ve ark., (2020) olarak sıralanabilir. CHAOS 2015 yılı raporunda da proje ekibine vurgu yapılmıştır.

Proje ekibi aynı zamanda bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısında da kilit rol oynayabilir. Tasarım ekibi, işbirliği, uzmanlık ve etkili iletişim yoluyla bilişim sisteminin hedeflerine ulaşmaya önemli ölçüde katkı sağlayabilir. Her üyenin, belirlenen hedeflere odaklanmak, proje süreçlerini yönetmek ve projenin genel başarısına katkıda bulunmak için belirli sorumlulukları olmalıdır. Öncelikle proje ekibi üyeleri arasında açık ve etkili iletişimin sağlanması önemlidir. İyi iletişim bilgi

alışverişini artırır, bilişim sistemi geliştirme sürecinin ilerleyişini şeffaf hale getirir ve ekibin birbirine destek olmasına olanak tanır. Ekip içerisinde işbirliği, tartışma ve yapıcı fikir alışverişi kültürü oluşturulursa bilişim sistemi geliştirme sürecinin başarısı artırılabilir. Proje ekibinin her üyesi kendi uzmanlık alanına odaklanmalı ve bu alanlardaki becerilerini en üst düzeye çıkarmalıdır. Bu, projede karşılaşılan zorluklara daha etkili çözümlerin bulunmasına yardımcı olur ve projenin genel kalitesini artırabilir. Ekip üyeleri arasındaki güven, işbirliği ve sorunları çözme yetenekleri, BT sistemi geliştirme sürecinin başarısını etkileyen temel unsurlar olarak gösterilebilir.

Proje ekibinin motivasyonunun yüksek tutulması önemlidir. Ekip üyelerinin proje hedeflerine bağlılıkları ve projenin genel başarısına olan tutkuları, proje zorluklarının üstesinden gelme ve çözüme kararlılıklarını artırabilir. Ayrıca bilişim sistemi geliştirme sürecinde ekip üyelerine öğrenme fırsatı vermek onların motivasyonunu artırarak kişisel ve mesleki gelişimlerine de katkı sağlayabilir. Proje ekibinin de esnek olması ve değişen koşullara hızlı uyum sağlaması da gereklidir. Projenin uygulanması sırasında ortaya çıkabilecek değişikliklere uyum sağlamak, ekip üyelerinin uyum yeteneğini artırabilir ve projenin sürekliliğini sağlayabilir.

Bu bağlamda bilişim sistemleri geliştirme sürecinde etkili bir proje ekibinin, etkili iletişim, yeterlik, motivasyon ve esneklik gibi temel unsurları içeren bir takım özelliklere sahip olması gerekir. Her ekip üyesinin kendi rolünü üstlenmesi ve proje hedeflerine odaklanması bilişim sistemleri projelerinin başarısını artırabilir.

Üst yönetim ile proje ekibi arasındaki etkileşim de bilişim sistemleri geliştirme sürecinin başarısı için çok önemlidir. Her iki taraf arasındaki etkili işbirliği, süreç başarısı için önemli bir temel oluşturur. Ekibin üst yönetim tarafından belirlenen stratejik hedeflere odaklanmasını sağlamak, açık iletişim kanallarını sürdürmek ve proje süreci boyunca karşılıklı güven oluşturmak, projenin başarılı yönetimine ve tamamlanmasına katkıda bulunabilir. Ayrıca her iki tarafın öğrenmeye ve sürekli iyileştirmeye açık olması, gelecekteki projelerde kazanılan deneyimlerden yararlanılarak daha etkili stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu bağlamda yöneticilerin yönetsel vizyonu ile proje ekibinin işbirliği ve bilgi düzeyi arasındaki uyum, bilişim sistemleri projelerinin başarısını etkileyen temel faktörlerdir. Başarılı projeler esnek, motive ve iletişimsel bir işbirliği ortamında, hedef odaklı bir şekilde hayata geçirilir ve her iki tarafın katkısı en üst düzeye çıkarılır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Ahmed, R., Mohamad, N. A. B. & Ahmad, M. S. (2016). Effect of multidimensional top management support on project success: An empirical investigation. *Quality & Quantity*, 50, 151-176.

- Al-Karaghoulı, W. Y. R. (2005). *Information systems failure: a business-led knowledge requirements framework for modeling business requirements, information systems, computing and mathematics* [Doktora Tezi]. Brunel University, London, İngiltere.
- Arnaiz, F. D., Alvarez, V., Montequin, V. R., & Cousillas, S. M. (2022). *Identifying critical success factors in continuous improvement projects in a steel company*. *Procedia Computer Science*, 196, 832-839.
- Augustine, S., Payne, B., Sencindiver, F. & Woodcock, S. (2005). Agile project management: Steering from the edge. *Communications Of The ACM*, 12(48), 85-89.
- Bryde, D.J. & Robinson, L. (2005). Client versus contractor perspectives on project success criteria. *International Journal of Project Management*, 23(8), 622-629.
- Cadle, J. & Yeates, D. (2004). *Project management for information systems*. Pearson education.
- Ceschi, M., Sillitti, A., Succi, G. & Panfils, S.D. (2005). Project management in plan-based and agile companies. *IEEE Software*, 22(3), 21-27.
- CHAOS Report. Standish Group 2015 Chaos Report. <http://www.infoq.com/articles/standish-chaos-2015> adresinden 20 Şubat 2024 tarihinde alınmıştır.
- Chow, T.& Cao, D.B. (2008). A survey study of critical success factors in agile software projects. *The Journal of Systems and Software*, 81, 961–971.
- Çokluk, O., Şekercioğlu, G. & Büyüköztürk, S. (2010). Sosyal bilimler için çok değişkenli istatistik SPSS ve LISREL uygulamalar. Ankara: Pegem Akademi.
- Fayaz, A., Kamal, Y., Amin, S. & Khan, S. (2016). Critical success factors in information technology projects. *Management Science Letters*, 7(1), 73–80.
- Fortune, J. & White, D. (2006). Framing of project critical success factors by a systems model. *International Journal of Project Management*, 24(1), 53-65.
- Hajj, M.A. (2019). *Critical success factors for unmanned aerial vehicles (UAVs) technology implementation in the turkish construction industry, civil engineering* [Yüksek Lisans Tezi], Beirut: Beirut Arab University.
- Hassan, S., Farhana S.A.N., Mahirah, S. & Jimisiah, K.F. (2018). Evaluating critical success factors and level of challenges in project life cycle (PLC). *International Journal of Engineering ve Technology*, 7, 67-68.
- Hughes, S., (2010). Five critical success factors for project managers. <https://www.ies.ncsu.edu/blog/five-critical-success-factors-for-project-managers/> adresinden 20 Şubat 2024 tarihinde alındı.

- Ihuah, P.W., Kakulu, II. & Eaton, D. (2014). A review of critical project management success factors (CPMSF) for sustainable social housing in Nigeria. *International Journal of Sustainable Built Environment*, (3), 62-71.
- Kır, E. (2007). *Yazılım Sektöründe Proje Yönetimi* Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı [Yüksek Lisans Tezi]. Kadir Has Üniversitesi, İstanbul.
- Lindvall, M., Muthig, D., Dagnino, A., Wallin, C., Stupperich, M., Kiefer, D., ... & Kahkonen, T. (2004). Agile software development in large organizations. *Computer*, 37(12), 26-34.
- Martinez, I., Viles, E. & Olaizola I.G. (2021). A survey study of success factors in data science projects. 2021 IEEE International Conference on Big Data, *IEEE Dü.*: 2313-2318.
- Nasir, M.H. & Sahibuddin AS. (2011). Critical success factors for software projects: A comparative study. *Scientific Research and Essays*, 6(10), 2174-2186.
- Özgüler, I.S. & Yılmaz, S. (2016). Impact of personal characteristics on project management. *PM World Journal*, 5(6), 1-13.
- Pells, D. L. (2010). IT Project Failures
[http://www.maxwideman.com/guests/7_reasons/3.htm#:~:text=The%20OASIG%20Study%20\(1995\)&text=Information%20was%20collected%20from%2045,projects%20failing%20is%20some%20respect](http://www.maxwideman.com/guests/7_reasons/3.htm#:~:text=The%20OASIG%20Study%20(1995)&text=Information%20was%20collected%20from%2045,projects%20failing%20is%20some%20respect) adresinden 15 Şubat 2024 tarihinde alınmıştır.
- Pirzadeh, L. (2010). *Human factors in software development: A systematic literature review* [Yüksek Lisans Tezi]. Chalmers University Of Technology, Göteborg, İsveç.
- Pinto, J. & Mantel, S. (1990). The cause of project failure. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 37(4), 269-276.
- Pinto, J. & Prescott, J.E. (1988). Variations in critical success factors over the stages in the project life cycle. *Journal of Management*, 14(1), 5-18.
- Pinto, J.K. & Slevin, D.P. (1987). Critical factors in successful project implementation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 34(1), 22-27.
- Pınar, M., Büyüktanır, B., Emanet, Ş. & Doğan, B. (2020). Yazılım projelerinde fazla mesainin proje ekibi ve projenin yönetimine etkisi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(4), 420-429.
- Sanjuan, A. G. & Froese T. (2013). *The application of project management standards and success factors to the development of a project management assessment tool*. 26th IPMA World Congress. Greece. 74, 91-100.
- Shenhar, A. J. & Dvir, D. (1996). Toward a typological theory of project management. *Research Policy*, 2(4): 607-632.

- Shenhar, A., Dir, D., Levy, O. & Maltz, A.C. (2001). Project success: a multidimensional strategic concept. *Long Range Planning*, 34(6): 699-725.
- Stankovic, D., Nikolic, V., Djordjevic, M. & Cao, D.B. (2013). A survey study of critical success factors in agile software projects in former Yugoslavia IT companies. *The Journal of Systems and Software*, (83), 1663–1678.
- Thomas, G. & Fernandez, W. (2008). Success in IT projects: A matter of definition? *International Journal of Project Management*, 26(7), 733-742.
- Thompson, B. (2004). *Exploratory and confirmatory factor analysis: Understanding concepts and applications*. American Psychological Association. Washington DC, USA:
- Uluocak, B. (2014). *Project success perception and critical success factors affecting project performance: The case of Turkish information technology sector* [Doktora Tezi]. Yeditepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İşletme Ana Bilim Dalı, İstanbul.
- Victor, O.I., Emeka, N.G. & Chukwudi, N. (2014). Impact assessment of factors affecting information technology projects in Rivers State, Nigeria. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(4), 757-764.
- Yasan, E. (2019). *Proje yönetiminde başarı kriterleri bir uygulama* [Yüksek Lisans Tezi]. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Mühendislik Yönetimi Anabilim Dalı, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul.
- Yavuz, H. (2018). *The critical success factors for manufacturing execution systems (MES) adoption in the defense industry of Turkey: An industrial case study* [Yüksek Lisans Tezi] Orta Doğu Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Bilim ve Teknoloji Politikaları Ana Bilim Dalı, Ankara.
- Zwikael, O. (2008). Top management involvement in project management: A cross country study of the software industry. *International Journal of Managing Projects in Business*, 1(4), 498-511.



CALIBRATION OF CHABOCHE KINEMATIC HARDENING MODEL PARAMETERS BY OPTIMISATION

CHABOCHE KİNEMATİK PEKLEŞME MODELİ PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYON İLE KALİBRE EDİLMESİ

Alişan ARASLI¹

İlyas KACAR²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1449025>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
ikacar@gmail.com

Received
(Geliş Tarihi)
08.03.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
01.08.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
02.08.2024

Abstract

Drag links are used in the automotive industry mostly, and during painting, their ends are protected against paint by two types of cap productions. While one is machined, the other is cold formed. In this study, a finite element simulation for the deformation process of a drag link's cap made from St52 alloy is performed. For the plasticity model, Chaboche's nonlinear kinematic hardening rule is used with the associated flow rule and Von Mises yield criterion. Chaboche's parameters are determined by low cycle fatigue test by applying curve fitting methods to one hysteresis loop. Furthermore, the Chaboche model parameters are calibrated by the optimization process. The final diameters of the cap measurements are compared with those obtained from the optimized model. Therefore, a comprehensive methodology is presented for the determination and calibration of Chaboche kinematic hardening model parameters. Chaboche's calibrated parameters are $YS=370,73$ MPa, $C=3513,5$ MPa, and $\gamma=47,958$ while their initial values are $YS=360$ MPa, $C=3500$ MPa, and $\gamma=90$.

Keywords: Chaboche model, kinematic hardening, optimization, low cycle fatigue, Cold forming, plasticity.

Öz

Rot kolu çoğunlukla otomotiv endüstrisinde kullanılmakta ve boyama sırasında uçları iki tip kapak üretim yöntemiyle boyaya karşı korunmaktadır. Bunlardan biri talaşlı imalat, diğeri ise soğuk şekillendirilmiştir. Bu çalışmada, St52 alaşımından yapılmış bir rot kolunun kapağının deformasyon işlemi için bir sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Plastisite modelini oluşturmak için Chaboche'nin doğrusal olmayan kinematik pekleşme kuralı, ilişkili akış kuralı ve Von Mises akma kriteri kullanılmıştır. Chaboche parametreleri, bir histerezis döngüsüne eğri uyurma yöntemleri uygulanarak düşük çevrimli yorulma testi ile belirlenmiştir. Ayrıca, Chaboche model parametreleri optimizasyon işlemi ile kalibre edilmiştir. Kapak ölçümlerinin nihai çapları, optimize edilmiş modelden elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Chaboche kinematik pekleşme modelinin parametrelerinin belirlenmesi ve kalibrasyonu için kapsamlı bir yöntem sunulmuştur. Kalibre edilen Chaboche parametreleri $YS=370,73$ MPa, $C=3513,5$ MPa ve $\gamma=47,958$ iken başlangıç değerleri $YS=360$ MPa, $C=3500$ MPa ve $\gamma=90$ 'dır.

Anahtar Kelimeler: Chaboche modeli, kinematik pekleşme, optimizasyon, düşük çevrimli yorulma, soğuk şekillendirme, plastisite.

¹Şeyh Şamil, Ankara, Türkiye.
alisanarasli@gmail.com, Orcid.org/0000-0002-3724-5429.

²Niğde Ömer Halisdemir University, Engineering Faculty, Department of Mechatronics Engineering, Niğde, Türkiye.
ikacar@gmail.com, Orcid.org/0000-0002-5887-8807.

1. INTRODUCTION

Drag links are used to change the direction of the vehicle by transferring the steering movement to the wheels in heavy and light commercial vehicles (Ditas, 2019). The drag link consists of 33 critical parts, including two rod ends. One of the most critical parts of a drag link is the ball joint. An example of the drag link and details of the rod end are shown in Figure 1.

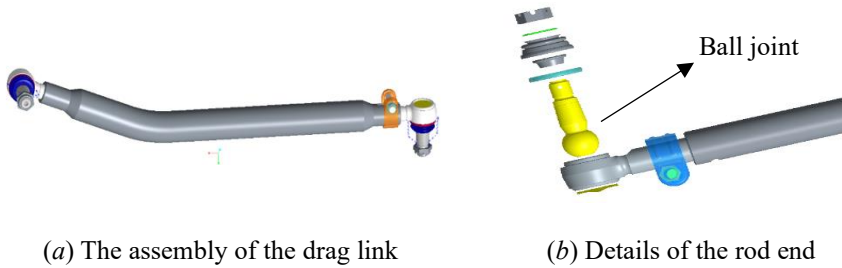


Figure 1. Drag Link

Drag links are mounted on the vehicle with the help of a ball joint and nut. Fixing of the drag link to the vehicle is shown in Figure 2.

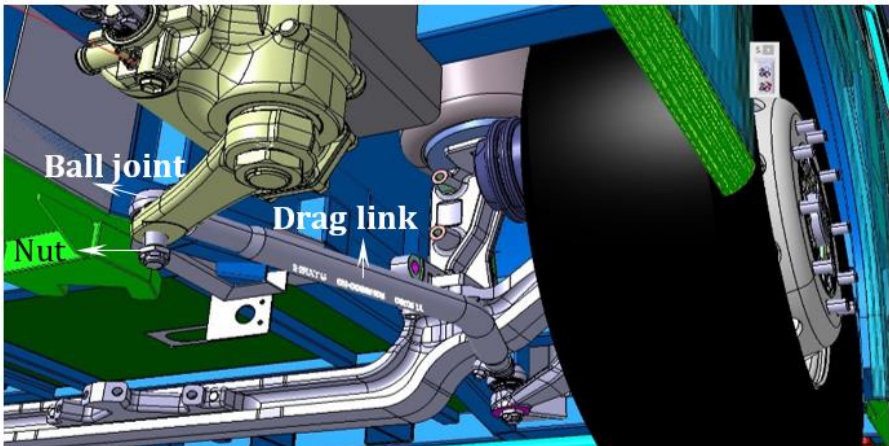


Figure 2. Drag Link Assembly on The Vehicle

As shown in Figure 2, the ball joint and nut are of high importance during assembly. Therefore, any faults in the ball joint and nut threads will become a problem during the assembly phase. In this regard, the most common fails are seen in the machining and painting process. Fails in the painting process are shown in Figure 3-a.



Figure 3. Process Faults and Cleaning Brush
(a) A Fail in The Painting Process (b) Cleaning Brush

Because of this fail, the ball joint threads must be cleaned with an additional brushing operation to ensure well-suit between the joint and the nut. The cleaning brush is shown in Figure 3-b. Kaizen studies were conducted in Ditaş Corp. to prevent these fails in the painting operation (Ditaş, 2019). It was decided to make paint protection caps based on the results of these Saizen studies. Paint protection caps are shown in Figure 4.

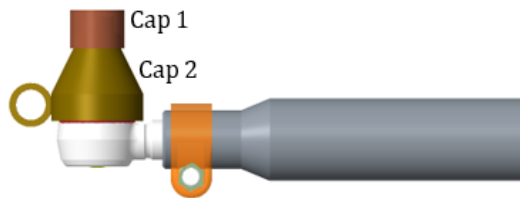


Figure 4. Paint Protection Caps

The cap 1 is produced during the machining operation. It is for clamping the end of the ball joint. Thus, it allows connection with cap 2. The cap 2 is produced in the cold forming process. Any small defect seen in the paint process affects the vehicle assembly. Thus, the cold-forming process must be performed accurately. Therefore, accurate mold dimensions and forming force are required for accurate results. Finite element simulations are an effective tool for predicting process parameters by simulating deformation processes (Kacar, 2023). Plasticity theories are used to determine the amount of plastic deformation (ϵ^p) in a deformation process. However, the determination of the plastic part of the deformation requires a flow criterion, a hardening rule, and a flow rule. There are 2 types of hardening rules in the simulations. These are the isotropic and the kinematic rule. Combining of both is possible. In this study, Chaboche's hardening model, which is a type of kinematic hardening model, was used.

First, with Prager's hardening rule (Prager, 1949), linear kinematic hardening was included in simulations and then modified by (Ziegler, 1959). However, these linear hardening plasticity models are not sufficient to predict the Bauschinger effect, multiaxial ratcheting, plastic strain accumulation, or shakedown. Therefore, nonlinear

kinematic models were developed on the basis of the equation of Armstrong and Frederick (Armstrong and Frederick, 1966). Armstrong and Frederick's rule includes a strain hardening and recovery term in their equation. Then, based on changing the dynamic-recovery term in the formula of Armstrong and Frederick, many other hardening plasticity models were developed, one of which was Chaboche's plasticity model (Chaboche, 1986; Chaboche, 1989, Cruise & Gardner, 2008).

In industry, there are many applications of cold forming processes performed on many materials. In addition, cold forming is used in most materials, including stainless steel [8] and two grades of carbon steel (Kuhn et al., 1973). However, there is no study on the 70x3-mm pipe made from St52 alloy which is cold-formed for the paint protection caps. It has axially symmetrical geometry (Sevenler et al., 1987).

The aim of this study is to determine the best hardening model parameters for the production of the protection caps made by cold deformation. It is a process in which plastic flow occurs due to both contact and large deformation. In order to simulate this process with high accuracy, a constitutive model should be used in the simulation. A constitutive model includes 3 aspects: Yield criterion, hardening rule, and flow rule. However, the selection of the constitutive equation model and its parameters is a big problem. Because many issues require fine tuning the model parameters such as different material, different deformation process, different geometry, different temperature, different deformation rate, etc.. This fine tuning process is called calibration. In this study, the constitutive equation is established and the hardening rule is calibrated to be used for cap deformation.

In this study, the Chaboche's nonlinear kinematic hardening parameters for 70x3-mm St52 steel pipe are determined by applying curve fitting methods to the tension-compression cycling test data. These data are used to constitute a plasticity model for simulation based on finite element method. The deformation has cold forming process of the painting protection cap on the drag link. Furthermore, the Chaboche model parameters were calibrated by an optimization process. Finally, the directional deformations measured experimentally are compared with those obtained from the optimized model. Therefore, a comprehensive methodology is presented for the determination and calibration of Chaboche kinematic hardening model parameters.

2. COLD FORMING

Plastic deformation of the work piece with a load applied without the need for temperature is called cold forming. The heating phase applied in hot forming processes is not present in cold forming. Because of the friction force during deformation, a slight increase in temperature can be observed in the work piece. In addition, cold forming processes in small diameters are preferred because they are faster than hot forming. Figure 5 shows the setup of the cold forming process. Figure 5-*a* shows the location of the punch, pipe, and die. Figure 5-*b* shows their details.

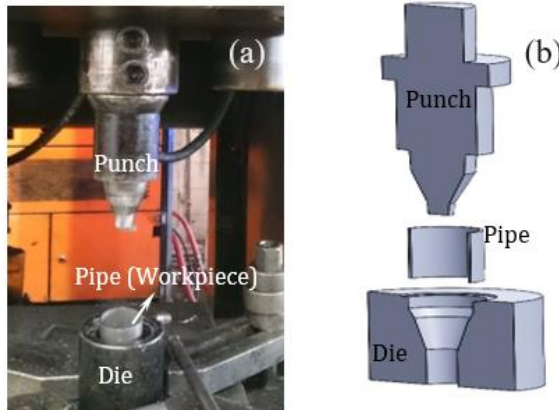


Figure 5. Set-up of The Cold Forming Process
 (a) Mold and Work Piece (b) Cutaway View

In general, cold forming is performed on a work piece placed on a fixed bottom mold by the load application of the movable upper punch. While one end contracts, the other end's diameter does not change. However, between both ends, large deformation occurs. In the finite element simulation, we must create frictional contacts between the pipe and the mold surface. To provide permanent deformation on the cap (deformed pipe), the analysis must include a plasticity model. Frictional contact, large deflection, and plastic deformation lead the analysis to nonlinear behaviour inherently.

3. MATERIAL AND METHOD

As material, St52 alloy is used. Its elemental composition is given in Table 1.

Table 1. Chemical Composition (weight %) of The St52 Alloy

| | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo |
| 0,19 | 0,406 | 1,37 | 0,018 | 0,0072 | 0,04 | 0,08 | 0,015 |
| Al | Cu % | Co | Ti | Nb | V | W | Pb |
| 0,047 | 0,04 | 0,005 | <0,0010 | <0,0030 | <0,0010 | 0,025 | <0,0030 |
| B | Sn | Zn | As | Bi | Ca | Ce | Fe |
| <0,0005 | 0,0085 | 0,0044 | 0,008 | <0,0020 | 0,0005 | <0,0030 | <97,7 |

The hardening model parameters' determining and calibration is given in Figure 6 schematically. It describes the plasticity model.

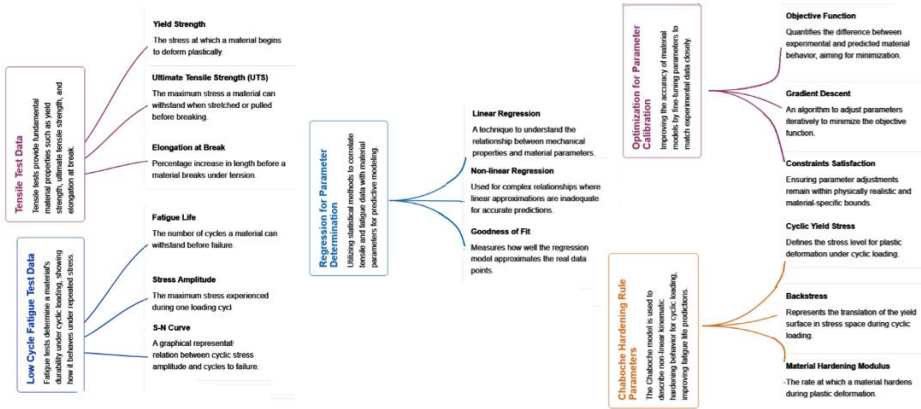


Figure 6. Schematic Representation of The Calibration of A Plasticity Model

3.1. Monotonic Tensile Test

A tensile test bench was used to determine the mechanical properties of the St52 alloy. Rectangular dog-bone-shaped specimens are prepared following the ASTM E8 standard [25]. The dimensions of the specimen are shown in Figure 7-a. Tensile tests were performed on a Shimadzu Autograph 100 kN testing machine with a data acquisition system maintained by a digital interface board using a specialized computer program. Material deformation is measured using a video-type extensometer measurement system. The tensile tests are performed at 25 mm/min (0,0083 Hz for a 50-mm gage length) strain rate. The test is performed at room temperature. The result of monotonic tensile test is shown in Figure 7-b. The diagram includes the true stress and true total strain.

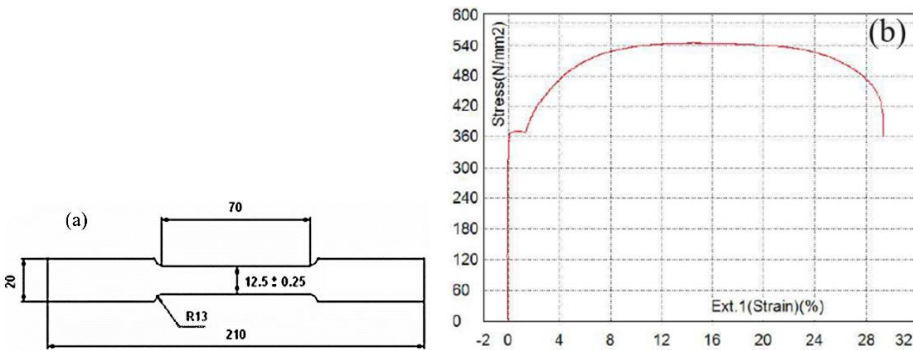


Figure 7. (a) Specimen Dimensions For Monotonic Tensile Test (in mm)
(B) Test Data

Table 2. Mechanical Properties of St52 Steel

| Property | Value |
|---------------------------------|---------|
| Density (gr/cm ³) | 7,85 |
| Young modules 8GPa) | 207 |
| Poisson ratio | 0,28 |
| Yield strength (MPa) | 373,806 |
| Ultimate tensile strength (MPa) | 414,047 |

3.2. Low Cycle Fatigue Test

Low cycle fatigue (LCF) tests give curves called hysteresis loops. Since these curves exhibit the material's hardening, they are also used to determine the hardening model parameters. In fact, one loop is sufficient to determine the Chaboche model parameters, (YS , C , and γ). The test is performed using strain-controlled method. Symmetric strain amplitude is applied. The dimensions of the samples are shown in Figure 8-*a*. In addition, there are holes on the specimen. These holes ensure that cantilever supports are ensured at the ends of the specimen during the tension and especially compression strokes. Figure 8-*b* shows a stable loop obtained at room temperature using a symmetrical strain-controlled loading method. The diagram includes the true stress and true plastic strain where its elastic portion is removed. The deformation ranges are $\pm 0,08$, $\pm 0,06$, $\pm 0,03$, $\pm 0,05$ (strain ratio $R = -1$). The test is conducted at a strain rate of 1 mm/min (0,00033 Hz for a 50-mm gage length). The Shimadzu-Autograph 100 kN tensile testing machine is also utilized to perform this test. The test is performed at room temperature. The experimental data were pre-processed to remove for smoothness in the loop shape.

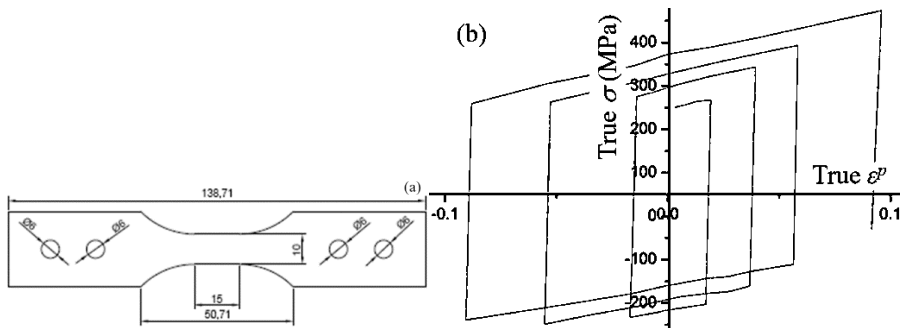


Figure 8. (a) Test Specimens (b) Low Cycle Fatigue Test Data (3 loops)

The Chaboche hardening rule consists of one term. Table 3 shows the coefficients. Since the deformation is low in the pipe bending process, only the innermost of the 3 loops in the graph is used. Nonlinear regression is performed on this loop data. The "preprocessor→material Props→materials models→structural→nonlinear→inelastic-plastic curve fitting" module in the mechanical APDL module of Ansys© is used for the regression. $\{YS, C, \gamma\}$ are considered as the parameters. Initially, these parameters were set to 1. The maximum number of iterations was limited to 1000 in order to control the computational process. Additionally, normalized error, residual, and coefficient

tolerance were utilized as additional criteria to stop the iterations. In order to achieve the best fit, the goals for these criteria were set to zero. For the error minimization, the Levenberg-Marquard's optimization algorithm was employed. The confidence level for the curves was set at 95%, ensuring a reliable estimation of the results. After the regression, Table 3 shows Chaboche's parameters.

Table 3. Chaboche Parameters

| | YS (MPa) | C (MPa) | γ |
|--------|----------|---------|----------|
| Values | 360 | 3500 | 90 |

4. CONSTITUTIVE EQUATION

Also referred to as the plasticity model, the constitutive equation consists of a yield hypothesis, a hardening rule, and a flow rule. The following section delves into the plasticity model utilized in the study.

4.1. Yield Criteria

General equation of the Von Mises yield function is given in Eq. (1).

$$f(\sigma_{ij}) = \Phi(\sigma_{1,2,3}) - (\bar{\sigma})^2 = 0 \quad (1a)$$

$$\Phi(\sigma_{1,2,3}) = \frac{|\sigma_1 - \sigma_2|^2 + |\sigma_2 - \sigma_3|^2 + |\sigma_3 - \sigma_1|^2}{2} \quad (1b)$$

where $\bar{\sigma}$ is the equivalent stress, $\Phi(\sigma_{1,2,3})$ is its yield function and $\sigma_{1,2,3}$ are principal stresses. Similarly, the Tresca yield function is given in Eq. (2).

$$f(\sigma_{ij}) = \Phi(\sigma_{1,2,3}) = (\bar{\sigma}) \quad (2a)$$

$$\Phi(\sigma_{1,2,3}) = \max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|) \quad (2b)$$

4.2. Hardening Rule

Equation (3) is a general yield function which includes both kinematic (α_{ij}) and isotropic (σ_h) hardening rules.

$$\bar{\sigma}(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - \sigma_h = 0 \quad (3)$$

where, the term α_{ij} is called "back stress" and some α_{ij} functions α_{ij} suggested by Prager, Armstrong-Frederic, Chaboche, Yoshida-Uemori etc... In this study, only Chaboche rule is used. Therefore $\sigma_h = 0$ as seen in Eq. (4). The term α_{ij} which is involved in the equation, indicates that the origin of the surface drawn by the equation will change from center to α_{ij} . Thus, different hardening formations are possible in the tensile and compression zones.

$$\bar{\sigma}(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = 0 \tag{4}$$

In this study, the back stress equation of Chaboche is used and is given in equation (5).

$$\left(\dot{\alpha}_{ij}\right)_m = \underbrace{\frac{2}{3} C_m \dot{\epsilon}_{ij}^p}_{\text{linear terim}} - \underbrace{\gamma_m (\alpha_{ij})_m \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p : \dot{\epsilon}_{ij}^p}}_{\text{recall term}} + \underbrace{\frac{1}{C_m} \frac{\partial C_m}{\partial T} (\alpha_{ij})_m \dot{T}}_{\text{Isima hizi terimi}} \quad m=1,2,\dots,n \tag{5}$$

where, the T temperature, C_m hardening module and γ_m are the coefficients of the reduction of the hardening ratio. These parameters have different values for each term. All of these parameters are determined in the same regression process. The regression process is applied to one hysteresis loop obtained from low cycle fatigue test. Chaboche’s back stress equation is a first-order ordinary differential equation. For the single-termed case (first-order), and no change in temperature, Eq. (6) will be achieved when this differential equation is integrated explicitly integrated according to ϵ_{ij}^p .

$$\alpha = \varphi \frac{C}{\gamma} + \left(\alpha_0 - \varphi \frac{C}{\gamma}\right) e^{-\varphi\gamma(\epsilon^p - \epsilon_0^p)} \tag{6}$$

In the equation, α_0 initial back stress value, ϵ_0^p is the initial plastic deformation value, φ is the sign depending on the tension/compression cases, $\varphi = \text{sgn}(\sigma - \alpha) = \pm 1$. In the case of uniaxial tensile, $\varphi = 1 = 1$ and $\varphi = -1$ in case of compression. In uniaxial tensile tests, assume the initial back stress $\alpha_0 = 0$ and the initial plastic deformation $\epsilon_0^p = 0$. In this case, the back stress equation is given by Eq. (7).

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(\epsilon^p)}) \quad \text{in tensile stroke (7a)}$$

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (-1 + e^{\gamma(\epsilon^p)}) \quad \text{in compressive stroke (7b)}$$

The Chaboche equation gives α_{ij} . It is necessary to substitute it in the equivalent stress equation of the yield criterion as $\bar{\sigma}(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - \sigma_0 = 0$ where σ_0 is the initial yield strength. In the case of uniaxial tensile, since the stress value in the tensile axis is already the principle stress, the equivalent stress in the uniaxial tensile will also be equal to the tension in the main axis x as $\bar{\sigma}(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = \sigma_x$. In this case, the equivalent stress becomes as follows.

$$\bar{\sigma}(\sigma_x - \alpha_x) = 0 \tag{8a}$$

$$\sigma_x - \alpha_x = 0 \tag{8b}$$

If the expressions in Eq. (7) are moved to Eq. (8), then the stress value will be added to the yield criterion function (Eq. 9).

$$(\sigma_x)_t = \frac{1}{2} + \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma(\epsilon_x^p)}) \quad \text{in tension (9a)}$$

$$(\sigma_x)_c = -\frac{1}{2} + \frac{C}{\gamma} (-1 + e^{\gamma(\epsilon_x^p)}) \quad \text{in compression (9b)}$$

4.3. Flow Rule

A flow rule is required to calculate the plastic strain (ε_{ij}^p) and its direction. It provides the relationship between plastic deformation and stress. There are two types as associated flow rule and non-associated flow rule. The general equation of a flow rule is $d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$ and the term λ is called the plastic multiplier. The expression f is a scalar function and is also called the plastic potential. If the yield stress is taken as the potential function, this equation becomes "associated flow rule". Otherwise, it is called non-associated flow rule. The associated flow rule is good at metals, while the non-associated flow rule is good at soil material.

5. CAP DEFORMING SIMULATIONS

Utilizing ANSYS© software, the deformation process is simulated through finite element analysis using an axial symmetric model for convenience, owing to all bodies have cylindrical shape. In the model, the y -axis is the axial symmetry axis. The cross-section of the geometry must be in the positive x -direction. The friction coefficient of 0,125 is established between the punch, die, and pipe. Punch and die tools are modeled as rigid bodies to shorten the calculation time of the simulation. The pipe is modeled as a flexible body using St52 material and Chaboche's plasticity model. Both bodies are assigned elastic properties from Table 2, while plastic properties from Table 3 are specifically designated for the pipe body. The punch is progressively moved towards the pipe body, as depicted in Figure 9. Initially, a dynamic analysis is conducted to induce plastic deformation in the pipe, followed by an optimization process aimed at calibrating the parameters of Chaboche model.

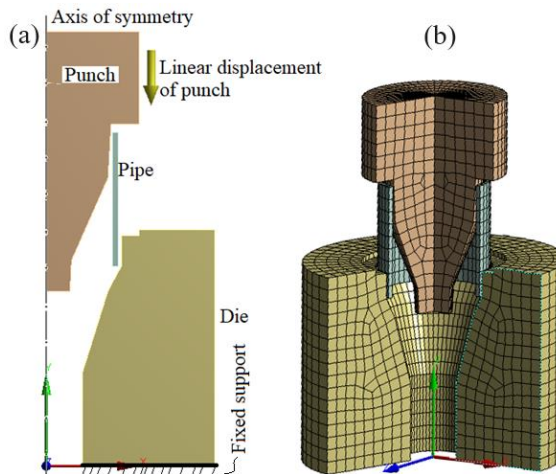


Figure 9. An Axial Symmetric Model of The Cold Forming Process and Its Finite Element Model (a) Axial Symmetric Model (b) Section View of The Finite Element Model

First, a mesh independence analysis is performed to ascertain the most suitable mesh size (Akkuş and Demir, 2016). The primary focus of this investigation lies in the evaluation of equivalent stress. It is observed that the stress results exhibit minimal variations beyond the utilization of 6845 elements. Consequently, the case with 6845 elements is chosen as the optimal element count. The simulations were executed on a computer equipped with a quad-core processor operating at 3,40 GHz and 8 GB of RAM.

6. OPTIMIZATION

The concept of optimization in mathematics involves the determination of the maximum, minimum, root, or any other value of a given function. In the optimization process, the effects of the Chaboche coefficients (YS , C , γ) on the pipes four diameters measured experimentally is determined using various combinations of YS , C , and γ . The combination providing the best simulation results closest to the experimentally obtained diameter values, will be selected as a candidate point of optimum value. Subsequently, these candidate points undergo verification through analyses.

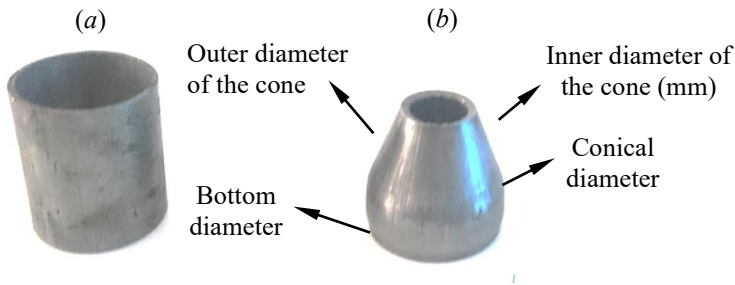


Figure 10. Cold Forming Process of The Pipe (a) Before and (b) Cold Forming

The experimental measurements are presented in Table 4. Figure 10 shows the cap before and after the deformation. At the beginning, the pipe's outer diameter is 70 mm and thickness is 1,5 mm. The pipe is shown in Figure 10-*a* and *b* before and after cold forming, respectively.

Table 4. Experimental Measurements of The Pipe

| Before shrinking | | After shrinking | | |
|-------------------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Inner radius of the pipe (mm) | Outer diameter of the pipe (mm) | Bottom diameter (mm) | Inner radius reduction (mm) | Conical diameter (mm) |
| Nominal: 21,00 | Nominal: 45,00 | Nominal: 73,00 | Nominal: 12,50 | Nominal: 70,00 |
| 21,52 | 45,44 | 72,67 | 12,335 | 69,85 |
| 21,94 | 45,24 | 73,03 | 12,515 | 70,00 |
| 21,75 | 44,77 | 73,08 | 12,540 | 70,37 |
| 21,79 | 45,20 | 73,00 | 12,500 | 71,09 |
| 21,83 | 45,23 | 72,95 | 12,475 | 69,59 |
| 21,78 | 45,57 | 72,90 | 12,450 | 69,44 |
| 21,96 | 45,21 | 73,57 | 12,785 | 70,12 |
| 21,75 | 45,45 | 72,79 | 12,395 | 69,98 |
| 21,81 | 45,29 | 72,97 | 12,485 | 70,38 |
| 21,92 | 45,45 | 73,37 | 12,685 | 70,40 |

In this study, for optimization, the constraints and the goals are applied as follows:

- No constraint for Y_S , which is an input variable
- No constraint for C , which is an input variable
- No constrain for γ , which is an input variable
- Bottom diameter should be 73 mm, which is an output variable
- Inner radius reduction should be 12,5 mm, which is an output variable

To achieve these aims and constrains, the upper and lower limits of the parameters are determined as in Table 5.

Table 5. Lower and Upper Limits of Design Variables Entered Into The Software

| | Y_S (MPa) | C (MPa) | γ |
|----------------|-------------|-----------|----------|
| Initial values | 360 | 3500 | 90 |
| Lower bound | 300 | 2500 | 10 |
| Upper bound | 400 | 4000 | 100 |

7. RESULTS AND DISCUSSIONS

7.1. Response Surface of Optimization

The optimization module calculates the 56 design points (DPs) inside the upper and lower limits. DPs created by the optimization module and the outputs (inner radius reduction, bottom diameter) obtained at the end of the solution for each point are presented in Table 6.

Table 6. DPs and Corresponding Response Points

| Number of DPs | Inputs | | | Outputs | |
|---------------|----------|-------------|------------|-----------------------------|----------------------|
| | YS (MPa) | C_I (MPa) | γ_I | Inner radius reduction (mm) | Bottom diameter (mm) |
| 1 | 370,000 | 3500,000 | 0,000000 | 12,1962 | 73,18609 |
| 2 | 369,9711 | 3007,191 | 23,31146 | 12,1962 | 73,23054 |
| 3 | 379,8293 | 3919,364 | 28,29513 | 12,19175 | 73,22193 |
| 4 | 374,3359 | 3995,884 | 2,593364 | 12,19129 | 73,20807 |
| 5 | 365,3523 | 3500,196 | 48,50218 | 12,19688 | 73,29505 |
| 6 | 360,0188 | 3597,085 | 13,16833 | 12,19694 | 73,17549 |
| 7 | 375,5858 | 3528,72 | 49,69065 | 12,19314 | 73,23783 |
| 8 | 369,9043 | 3984,597 | 46,55082 | 12,19621 | 73,21676 |
| 9 | 378,6832 | 3037,863 | 0,003689 | 12,19362 | 73,24799 |
| 10 | 379,8508 | 3994,644 | 49,5338 | 12,19223 | 73,22158 |
| 11 | 360,5086 | 3123,173 | 0,524996 | 12,1951 | 73,22787 |
| 12 | 364,6386 | 3958,324 | 2,361524 | 12,19671 | 73,29525 |
| 13 | 367,9182 | 3015,39 | 17,99522 | 12,19234 | 73,22602 |
| 14 | 379,8719 | 3744,171 | 16,69261 | 12,19223 | 73,18767 |
| 15 | 360,2709 | 3459,992 | 21,42955 | 12,19711 | 73,19113 |
| 16 | 379,1344 | 3374,817 | 15,78162 | 12,15288 | 73,23748 |
| 17 | 372,1451 | 3747,933 | 22,95937 | 12,19506 | 73,28925 |
| 18 | 372,3878 | 3220,819 | 48,0699 | 12,19375 | 73,19387 |
| 19 | 364,8329 | 3337,762 | 16,75598 | 12,19473 | 73,20053 |
| 20 | 364,6629 | 3218,356 | 30,47663 | 12,19671 | 73,22603 |
| 21 | 379,2263 | 3827,115 | 16,58148 | 12,17777 | 73,18016 |
| 22 | 365,1178 | 3678,777 | 21,36091 | 12,19606 | 73,26566 |
| 23 | 373,4013 | 3253,686 | 12,63112 | 12,19525 | 73,18251 |
| 24 | 375,741 | 3991,505 | 26,64477 | 12,19304 | 73,18009 |
| 25 | 366,0642 | 3000,393 | 49,55488 | 12,19675 | 73,25046 |
| 26 | 369,791 | 3801,112 | 4,127309 | 12,19623 | 73,18312 |
| 27 | 360,0526 | 3950,603 | 16,39369 | 12,19689 | 73,69971 |
| 28 | 360,8615 | 3688,096 | 44,36721 | 12,19486 | 73,2176 |
| 29 | 369,1803 | 3413,615 | 27,79114 | 12,19628 | 73,18089 |

| | | | | | |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30 | 370,3936 | 3673,645 | 49,64961 | 12,19613 | 73,22739 |
| 31 | 360,0542 | 3009,542 | 45,66033 | 12,19677 | 73,23484 |
| 32 | 373,0768 | 3011,189 | 5,623021 | 12,195 | 73,24051 |
| 33 | 365,2109 | 3980,406 | 30,26518 | 12,1969 | 73,25545 |
| 34 | 361,0191 | 3325,248 | 48,40544 | 12,19626 | 73,23605 |
| 35 | 366,8857 | 3168,001 | 5,677711 | 12,19667 | 73,27455 |
| 36 | 375,6488 | 3043,843 | 29,27166 | 12,19282 | 73,20419 |
| 37 | 379,8477 | 3990,551 | 4,899942 | 12,19223 | 73,24825 |
| 38 | 379,3254 | 3724,445 | 48,87776 | 12,19349 | 73,27701 |
| 39 | 378,7645 | 3315,722 | 45,24926 | 12,1312 | 73,40294 |
| 40 | 364,7521 | 3448,275 | 8,176088 | 12,1967 | 73,23751 |
| 41 | 365,8018 | 3783,93 | 46,40871 | 12,19682 | 73,24381 |
| 42 | 365,3909 | 3610,448 | 11,61875 | 12,19682 | 73,23469 |
| 43 | 363,2213 | 3000,526 | 17,08417 | 12,19505 | 73,24944 |
| 44 | 370,6 | 3981,152 | 17,16523 | 12,1961 | 73,21002 |
| 45 | 375,2963 | 3875,633 | 49,06934 | 12,19313 | 73,24169 |
| 46 | 373,5455 | 3519,123 | 26,83396 | 12,19524 | 73,23474 |
| 47 | 369,4801 | 3299,906 | 15,08326 | 12,19602 | 73,2461 |
| 48 | 379,6503 | 3048,764 | 48,05395 | 12,19231 | 73,20726 |
| 49 | 360,7634 | 3996,324 | 19,5934 | 12,19487 | 73,17475 |
| 50 | 379,8577 | 3127,642 | 26,50647 | 12,19223 | 73,23571 |
| 51 | 376,4269 | 3692,453 | 31,80996 | 12,13284 | 73,16684 |
| 52 | 367,9349 | 3315,648 | 48,59544 | 12,13438 | 73,28147 |
| 53 | 360,0196 | 3189,515 | 20,8113 | 12,19678 | 73,2991 |
| 54 | 379,9752 | 3554,105 | 0,61561 | 12,19173 | 73,28128 |
| 55 | 379,413 | 3525,533 | 37,95053 | 12,15377 | 73,19382 |
| 56 | 372,3861 | 3000,841 | 43,86515 | 12,19375 | 73,18608 |

It should be noted that these values are the values obtained as a result of simulation. The optimisation module uses them to determine a function based on curve fitting. This function is called response surface. It is shown in Figure 11. Both are created by an artificial neural network with one hidden layer and 3 neurons in. It is a type of multi-layer perceptron.

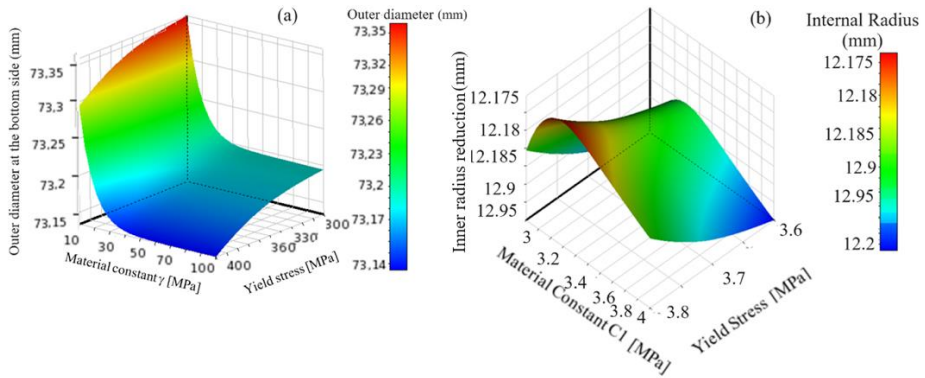


Figure 11. For (a) Outer Diameter and (b) Inner Radius, Response Surface Diagrams Showing The Relationship Between Input and Output Design Variables in The Optimization

7.2. Optimum Values

The optimum parameters are suggested as given in Table 7. Four optimization methods are employed such as MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm), NLPQL (Nonlinear Programming with Quadratic Lagrangian), MISQP (Mixed Integer Sequential Quadratic Programming), and screening.

Table 7. Candidate Points Suggested by Optimization Methods

| Optimization methods | C (MPa) | γ | YS (MPa) | Inner radius reduction (mm) | Bottom diameter (mm) |
|----------------------|---------|----------|----------|-----------------------------|----------------------|
| Screening | 3440,9 | 47,627 | 375,65 | 12,49878 | 73,18470 |
| MOGA | 3062,2 | 43,567 | 379,73 | 12,50156 | 73,16972 |
| NLPQL | 3513,7 | 47,955 | 370,78 | 12,50063 | 73,01945 |
| MISQP | 3513,7 | 47,955 | 370,78 | 12,50063 | 73,01945 |

The optimization module suggests the candidate points as optima. However, these values are obtained from the response surface by the optimization tool and need to be verified by re-simulating. The verification results are given in Table 8. As seen from table, NLPQL and MISQP provides the best fit where $YS=370,73$ MPa, $C=3513,5$ MPa, and $\gamma=47,958$.

Table 8. Verified Results

| Optimization methods | C (MPa) | γ | YS (MPa) | Inner radius reduction (mm) | Bottom diameter (mm) |
|----------------------|-----------|----------|------------|-----------------------------|----------------------|
| Screening | 3440,5 | 47,658 | 375,676 | 12,49685 | 73,18470 |
| MOGA | 3062,6 | 43,556 | 379,77 | 12,50685 | 73,19265 |
| NLPQL | 3513,5 | 47,958 | 370,73 | 12,50058 | 73,01964 |
| MISQP | 3513,5 | 47,958 | 370,73 | 12,50058 | 73,01964 |

7.3. Stress and Strain Response

As initial values $YS=360$ MPa, $C=3500$ MPa, and $\gamma=90$ are used, the obtained deformation results are given in Figure 12. Figure 13 gives the total strain and stress responses of the material collected from simulation. Figure 12 also gives Von Mises stress distribution on the deformed cap. The results are captured in the last sub-step of the last step.

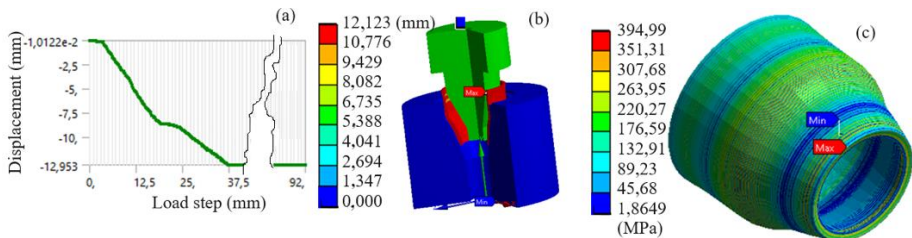


Figure 12. (a) Load Steps Applied and (b) Total Deformation Results (c) Von Mises Stress Distribution When $YS=360$ MPa, $C=3500$ MPa, and $\gamma=90$



Figure 13. Stress and Total Strain Diagram Obtained From The Analysis

As the optimum values $YS=370,73$ MPa, $C=3513,5$ MPa, and $\gamma=47,958$ are used, the obtained deformation results (inner diameter reduction) are given in Figure 14. Figure 15 gives Von Mises stress distribution.

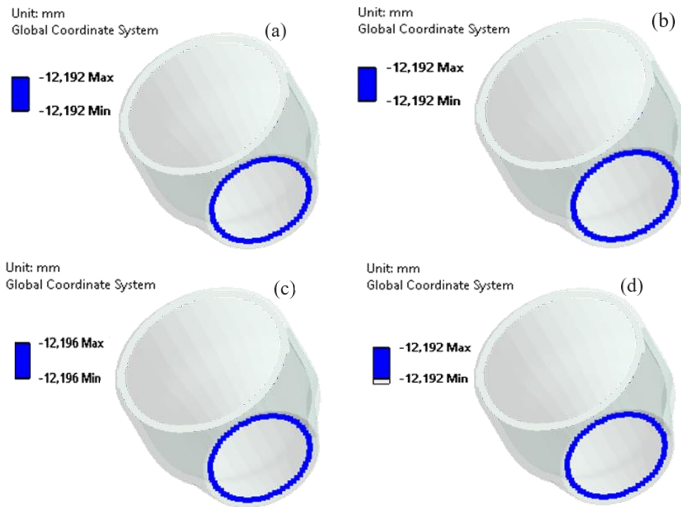


Figure 14. Inner Diameter Reduction (a) Screening, (b) MOGA, (c) NLPQL, (d) MISQP

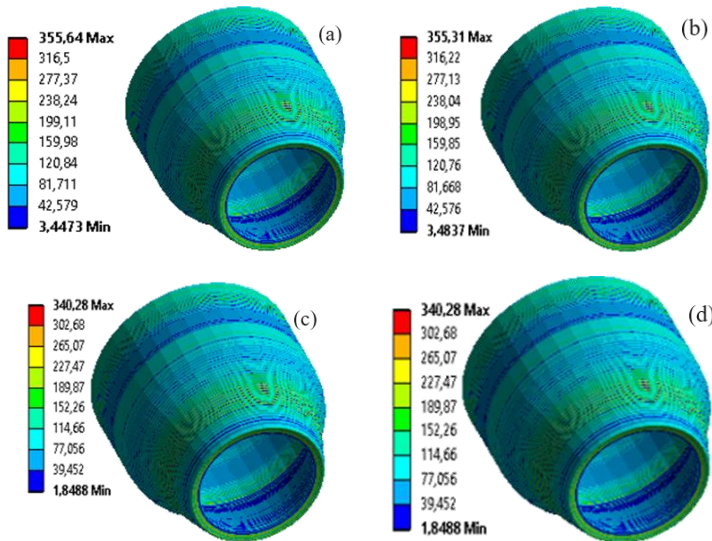


Figure 15. Von Mises Stress Distribution (MPa) (a) Screening, (b) MOGA, (c) NLPQL, (d) MISQP

8. CONCLUSIONS

The drag links play a crucial role in the automotive industry. This research employs a finite element simulation to analyse the deformation process of a drag link's cap made from St52 alloy. The plasticity model incorporates Chaboche's nonlinear kinematic

hardening rule, along with the associated flow rule and Von Mises yield criterion. The Chaboche parameters are determined through low cycle fatigue tests, utilizing curve fitting techniques on a single hysteresis loop. Additionally, the Chaboche model parameters are fine-tuned through various optimization techniques. Four optimization methods were performed to calibrate these test data. The main findings obtained from the investigations are listed below:

- The most consistent results are obtained without any dependency on initial values by the NLPQL and MISQP central differences method. Therefore, Chaboche's calibrated parameters are $YS=370,73$ MPa, $C=3513,5$ MPa, and $\gamma=47,958$.
- Response surfaces are obtained using the neural network method with one hidden layer and 3 neurons.
- The success of optimization methods strongly depends on both the initial values and the lower-upper bounds of the input variables. Any initial value can be selected technically. However, the raw parameters determined after curve-fitting can be used as initials. Their bounds should be set as half and two-times below and above their initial values, respectively.
- This study has future work potentials to investigate the combined hardening rules with more terms.

Author Contributions

All authors contributed equally.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest or competing interests regarding the publication of this paper.

Data and Code Availability

The data used in the study have already been given in the figures or tables.

Funding Sources

This study did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Research and Publication Ethics Statement

Research and publication ethics were followed in the study.

Acknowledgment

This work was supported by Ditaş Doğan Yedek Parça İmalat ve Teknik A.Ş. We would like to thank them for their support. We would like to thank Dr. Mehmet Seyhan, Karadeniz Technical University for providing the opportunity to use Ansys® software for simulations for educational purposes. We are very grateful to the reviewers for their valuable comments, which have been utilized to improve the quality of the paper.

REFERENCES

- Akkuş, Ö. & Demir, E. (2016). İki düzeyli olasılık modellerinde klasik meta sezgisel optimizasyon tekniklerinin performansı üzerine bir çalışma. *Istanbul Commerce University Journal of Science*, 15(30), 107-131.
- Armstrong, P.J. & C.O. Frederick, (1966). A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. *CEGB Report*, RD/B/N731, Berkeley Nuclear Laboratories.
- Chaboche, J.L., (1986). Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity. *International Journal of Plasticity*, 2(2);149-188.
- Chaboche, J.L., (1989). Constitutive-equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 5(3): p. 247-302.
- Cruise R.B. and Gardner L. (2008). Strength enhancements induced during cold forming of stainless steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(11), 1310-1316.
- Ditas Corp., (2019). Drag link, Retrieved January 07, 2019 from <http://www.ditas.com.tr/drag-link>
- Kacar, İ. (2023). Scientific Principles of Mechanical Design and Analysis. *Akademisyen Publishing House*, Ankara, First ed., 36-40.
- Kuhn, H. A. Lee P.W. & Erturk T. (1973) A fracture criterion for cold forming. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 95(4): 213-218.
- Prager W., (1949). Recent developments in the mathematical theory of plasticity. *Journal of Applied Physics*, 20(3): 235-241.
- Sevenler K., Raghupathi P.S., & Altan T., (1987). Forming-sequence design for multistage cold forging, *Journal of Mechanical Working Technology*, 14 (2), 121-135.
- Ziegler, H., (1959). A modification of Prager's hardening rule. *Quarterly of Applied Mathematics*. 17(1): 55-66.



CALCULATION OF HOMA AND BIRD AROMATICITY INDICES, NLO AND NBO PROPERTIES OF BENIDIPINE*

BENİDİPİNİN HOMA VE BIRD AROMATİKLİK ENDEKSLERİ,
NLO VE NBO ÖZELLİKLERİNİN HESAPLANMASI

Fatma KANDEMİRLİ¹

Derya Hilal TUNCEL²

Fatma GENÇ³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1480229>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
ftmgenc@yahoo.com

Received
(Geliş Tarihi)
22.11.2019

Revised
(Revizyon Tarihi)
22.11.2019

Accepted
(Kabul Tarihi)
22.11.2019

Abstract

Benidipine hydrochloride, being the derivate of 1,4-dihydropyridine is a calcium channel blocker antihypertensive drug. The aromaticity, natural bond orbital (NBO) and Nonlinear Optical (NLO) parameters properties of Benidipine (BEN) and BENHCl compounds were theoretically investigated using density functional theory (DFT) electronic structure method. Among the values of common aromaticity indices, the Harmonic Oscillator Aromaticity Model (HOMA) and BIRD's (Aromaticity Index) for electronic delocalization show that the aromaticity of the nitrophenyl group is higher in BEN and BENHCl compounds, and also the aromaticity in the gas phase is higher than that in water, octanol and DMF phase. In compound BEN, it was observed that as the dielectric constant of the medium increased, the aromaticity difference increased slightly. In the compound BEN, the correlation coefficient between HOMA values and aromatic fluctuation index (FLU), para delocalization index (PDI) and para-linear response (PLR) for the nitrophenyl group is higher than that the phenyl group. Donor-acceptor transitions, stabilization energies, intramolecular charge transfer were determined by natural population analyses. NLO parameters such as dipole moment, polarisability and first order hyperpolarizability values of the BEN and BENHCl compound were also studied.

Keywords: Benidipine, HOMA, BIRD, natural bond orbital, NLO.

Öz

1,4-dihidropiridin'in türevi olan benidipin hidroklorür, bir kalsiyum kanal bloker antihipertansif ilaçtır. Benidipin (BEN) ve BENHCl bileşiklerinin aromatiklik, doğal bağ orbital (NBO) ve Doğrusal Olmayan Optik (NLO) parametrelerinin özellikleri, yoğunluk fonksiyonel teorisi (DFT) elektronik yapı yöntemi kullanılarak teorik olarak araştırıldı. Ortak aromatiklik indeksi değerlerinden Harmonik Osilatör Aromatiklik Modeli (HOMA) ve elektronik delokalizasyon için BIRD's (Aromatiklik İndeksi), BEN ve BENHCl bileşiklerinde nitrofenil grubunun aromatikliğinin daha yüksek olduğunu, ayrıca gaz fazındaki aromatik de su, oktanol ve DMF fazındaki daha yüksektir. BEN bileşiminde ortamın dielektrik sabiti arttıkça aromatiklik farkının bir miktar arttığı gözlemlendi. BEN bileşiminde nitrofenil grubu için HOMA değerleri ile aromatik dalgalanma indeksi (FLU), para delokalizasyon indeksi (PDI) ve para-lineer yanıt (PLR) arasındaki korelasyon katsayısı fenil grubuna göre daha yüksektir. Donör-alıcı geçişleri, stabilizasyon enerjileri, molekül içi yük transferi ve doğal popülasyon analizleri ile belirlendi. BEN ve BENHCl bileşiminin dipol momenti, polarizasyon ve birinci dereceden hiperpolarizasyon değerleri gibi NLO parametreleri de incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Benidipin, HOMA, BIRD, doğal bağ orbital, NLO.

* Bu yayın Derya Hilal TUNCEL isimli öğrencinin Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, Türkiye. fkanemirli@yahoo.com, Orcid.org/0000-0001-6097-2184.

²Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Kastamonu, Türkiye. deryahilaltuncel@gmail.com, Orcid.org/0009-0000-0688-4722.

³İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Eczacılık Fakültesi, İstanbul, Türkiye. ftmgenc@yahoo.com, Orcid.org/0000-0002-5304-5347.

1. GİRİŞ

Aromatics are encounter in our daily lives. The chemistry of our body would be distorted in the absence of aromatic molecules in our system, also, we would be lacking many materials needs. Many industrial raw materials are aromatics based, ranging from polymer, medicine and various other industries (Edim et al., 2021).

Aromaticity, one of the most important concepts in chemistry, still does not have a unified definition (Krygowski et al., 2000). Since aromaticity is a collective phenomenon, various criteria must be used to discuss this term in any particular research topic (Matito et al., 2005).

Benidipine, also known as Benidipinum or Benidipine hydrochloride, a Long-acting T-type Calcium Channel Blocker, is commonly used to treat hypertension and angina pectoris (Seino et al., 2007; Tuncel & Kandemirli, 2024).

Benidipine is a triple calcium channel blocker that inhibits T type as well as L and N type calcium channels. The vasodilator effect of Benidipine, whose molecular formula is $C_{28}H_{32}ClN_3O_6$, is due to its affinity for dihydropyridine binding sites in calcium channels. Since Benidipine binds to calcium channels, it blocks calcium flow. The onset of action is slow, resulting in minimal tachycardia or palpitations (Gopika & Remi, 2018).

In this article, we introduced HOMA, BIRD, PDI, PLR, NLO and FLU indices for BEN and BENHCl compound in gas, n-octanol, DMF and water phases. Furthermore, we were led to NBO studies on BEN and BENHCl due to their pharmacological importance, but for which there are limited reports on their structural properties. Observations from NBO analysis will shed further light on understanding the stability of the molecule.

2. MATERIAL AND METHOD

2.1. Computational Methods

The structures of BEN and BENHCl molecules in gas, n-octanol, DMF and water phases were realized with Density Functional Theory (DFT) calculations using the Gaussian09 program, with the B3LYP hybrid functional and 6-311G(d,p) basis set and is displayed in Figure 1. n-octanol, DMF and water modeled by the conductor-like polar continuum model (CPCM).

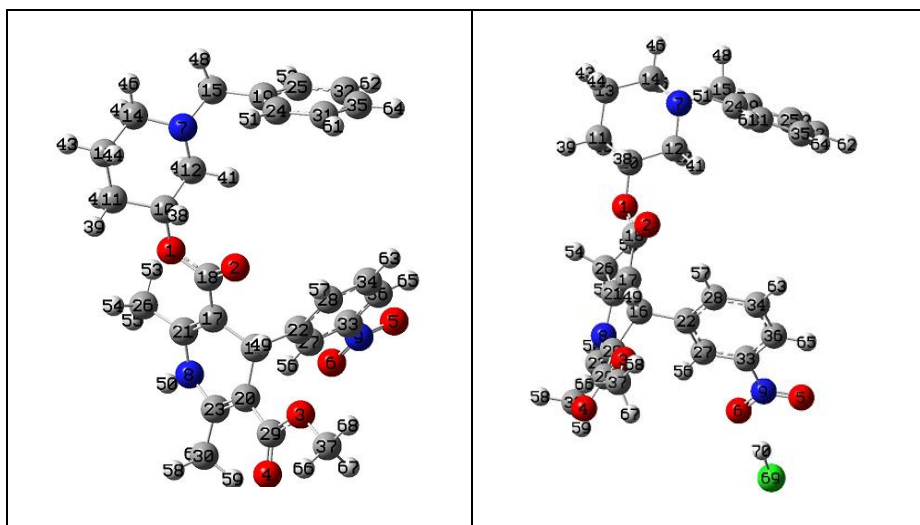


Figure 1. Optimized Molecular Structure with The Atomic Number

HOMA, BIRD, PDI, PLR indices were used to describe the aromaticity of these systems. HOMA index is known as displacement in cyclic structures and was defined by Kruszewski and Krygowski (Krygowski, 1993). PDI and FLU are both based on electron delocalization indices. A detailed NBO (Read et al., 1988) analysis was performed to understand the hyper conjugation interaction, which chiefly contributes for stabilization of BEN and BENHCl compound. With NBO analysis, the role of intermolecular orbital interactions or exchange transfer within a molecule is understood. It is calculated by taking into account all possible interactions between occupied donor and empty acceptor NBOs. Additionally, their energetic importance is predicted by second-order perturbation theory.

2.2. Result and Discussion

When the length of each bond is the same as the optimal value R_{Ref} , HOMA is equal to 1 and the ring is completely aromatic. If HOMA is equal to 0, the ring is not aromatic; if it is negative, the ring is anti-aromatic.

A decrease in the aromatic character of the π -electron system can be recognized by the increase in bond length change and the observed increase in the average bond length of the respective system.

In the DFT method, HOMA and BIRD indices in gas, n-octanol, DMF and water phases are calculated with B3LYP functionals and 6-311G(d,p) basis set and are given in Table 1 and Table S2-S4. The HOMA indices of the phenyl group of the BEN compound in the gas, n-octanol, DMF and water phases were found to be 0,986921, 0,982769, 0,982299 and 0,9822, respectively. The difference between the HOMA value of the phenyl group of the BEN compound in the gas phase and the HOMA values in n-octanol, DMF and water environments is very small and is, found to be as 0,004152, 0,004622 and 0,004721.

The HOMA indices of the nitrophenyl group of the compound BEN in the gas, n-octanol, DMF and water phases were found to be 0,988998, 0,987661, 0,987495, 0,987461, respectively. The difference between the HOMA value of the nitrophenyl group of the BEN compound in the gas phase and the HOMA values in n-octanol, DMF and water environments is very small and is found to be as 0,001337, 0,001503 and 0,001537, respectively.

As the dielectric constant of the medium increased, a slight decrease was observed in the aromaticity of the phenyl group and nitrophenyl group in the BEN compound. However, a slightly irregular change was observed in the BENHCl compound (Gajda et al., 2018). Since the aromaticity values of the phenyl and nitrophenyl groups of BEN and BENHCl compounds are close to 1, HOMA analysis shows that they have relatively strong aromaticity. In BEN and BENHCl compounds, the HOMA values of the nitrophenyl group are higher than the HOMA values of the phenyl group. This excess was found as 0,002077, 0,004892, 0,005196, 0,005261 for the BEN compound and 0,001083, 0,004274, 0,004892, 0,004543 for the BENHCl compound in gas, n-octanol, DMF and water environments.

In compound BEN, it was observed that as the dielectric constant of the medium increased, the aromaticity difference increased slightly in Table 1 and Table S.2-S.4.

Table 1. HOMA and BIRD Values of BEN and BENHCl Compounds in Gaseous Phase

| Comp | Group | Atoms | Contribution | Bond Lengths | N-term | Bond Lengths |
|--------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------|--------------|
| BEN | Phenyl | C32-C25 | -0,00176 | 1,394405 | 1,787283 | 1,394405 |
| | | C25-C19 | -0,00297 | 1,39631 | 1,777747 | 1,39631 |
| | | C19-C24 | -0,00515 | 1,398955 | 1,764574 | 1,398955 |
| | | C24-C31 | -0,00049 | 1,391371 | 1,802555 | 1,391371 |
| | | C31-C35 | -0,00199 | 1,394801 | 1,7853 | 1,394801 |
| | | C35-C32 | -0,00072 | 1,392099 | 1,798884 | 1,392099 |
| | | Aromaticity | HOMA | 0,986921 | BIRD | 97,85646 |
| | Nitrophenyl | C36-C33 | -0,00025 | 1,390401 | 1,807459 | 1,390401 |
| | | C33-C27 | -0,00016 | 1,389932 | 1,809832 | 1,389932 |
| | | C27-C22 | -0,00212 | 1,395022 | 1,78419 | 1,395022 |
| | | C22-C28 | -0,00672 | 1,400506 | 1,75688 | 1,400506 |
| | | C28-C34 | -0,00157 | 1,394036 | 1,789136 | 1,394036 |
| | | C34-C36 | -0,00019 | 1,390125 | 1,808855 | 1,390125 |
| | | Aromaticity | HOMA | 0,988998 | BIRD | 96,82656 |
| BENHCl | Phenyl | C32-C25 | -0,00169 | 1,394273 | 1,787946 | 1,394273 |
| | | C25-C19 | -0,00307 | 1,396449 | 1,777057 | 1,396449 |
| | | C19-C24 | -0,00506 | 1,398851 | 1,76509 | 1,398851 |
| | | 24C-C31 | -0,00053 | 1,391516 | 1,801822 | 1,391516 |
| | | C31-C35 | -0,00194 | 1,394726 | 1,785678 | 1,394726 |
| | | C35-C32 | -0,00077 | 1,392235 | 1,798198 | 1,392235 |
| | | Aromaticity | HOMA | 0,986943 | BIRD | 97,9114 |
| | Nitrophenyl | C36-C33 | -0,00054 | 1,391534 | 1,80173 | 1,391534 |
| | | C33-C27 | -0,00047 | 1,391323 | 1,802797 | 1,391323 |
| | | C27-C22 | -0,00158 | 1,394058 | 1,789027 | 1,394058 |
| | | C22-C28 | -0,00753 | 1,401244 | 1,75323 | 1,401244 |
| | | C28-C34 | -0,00178 | 1,394438 | 1,78712 | 1,394438 |
| | | C34-C36 | -0,00073 | 1,389302 | 1,813023 | 1,389302 |
| | | Aromaticity | HOMA | 0,988026 | Bird | 96,79117 |

The calculated BIRD indices of the phenyl group of the compound BEN in the gas, n-octanol, DMF and water phases were found to be 97,85646, 97,7685, 97,75407 and 97,74762, respectively. The difference between the BIRD value of the phenyl group of the BEN compound in the gas phase and the BIRD values in n-octanol, DMF and water environments is very small and was found to be 0,08796, 0,10239 and 0,10884, respectively.

Aromaticity was assessed at the same level of theory as: geometry-based HOMA of aromaticity, PDIs, FLU (Matito et al., 2005; Krygowski, 1993; Kruszewski & Krygowski, 1972; Poater et al., 2003).

In the DFT method, FLU, PDI, PLR indices of BEN and BENHCl compounds in gas, n-octanol, DMF and water phase with B3LYP functionals and 6-311G(d,p) basis set are calculated and given in Table 2-Table 4.

Table 2. FLU Values of BEN and BENHCl Compounds in Gas, n-octanol, DMF and Water Environment

| Phase | BEN | | BENHCl | |
|-----------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Phenyl | Nitrophenyl | Phenyl | Nitrophenyl |
| Gas | 0,000908 | 0,002913 | 0,000901 | 0,003198 |
| n-octanol | 0,000909 | 0,00306832 | 0,000916 | 0,003422 |
| DMF | 0,000910 | 0,003084 | 0,000916 | 0,003446 |
| Water | 0,000910 | 0,003087 | 0,000915 | 0,003451 |

Table 3. PDI Values of BEN and BENHCl Compounds in Gas, n-octanol, DMF and Water Environment

| PDI | BEN | | BENHCl | |
|-----------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Phenyl | Nitrophenyl | Phenyl | Nitrophenyl |
| Gas | 0,101226 | 0,091941 | 0,101181 | 0,090456 |
| n-octanol | 0,101343 | 0,091098 | 0,101256 | 0,089383 |
| DMF | 0,101352 | 0,091015 | 0,101267 | 0,089274 |
| Water | 0,101353 | 0,091000 | 0,101269 | 0,089253 |

Table 4. PLR Values of BEN and BENHCl Compounds in Gas, n-octanol, DMF and Water Environment

| PLR | BEN | | BENHCl | |
|-----------|----------|-------------|----------|-------------|
| | Phenyl | Nitrophenyl | Phenyl | Nitrophenyl |
| Gas | 0,609000 | 0,549424 | 0,609012 | 0,537577 |
| n-octanol | 0,608863 | 0,542532 | 0,608711 | 0,528510 |
| DMF | 0,608828 | 0,541857 | 0,608694 | 0,527615 |
| Water | 0,608819 | 0,541732 | 0,608689 | 0,527444 |

The correlation between the HOMA values of the phenyl and nitrophenyl groups of BEN and BENHCl compounds and the FLU, PDI and LPR values were examined and given in Figure 2-Figure 4.

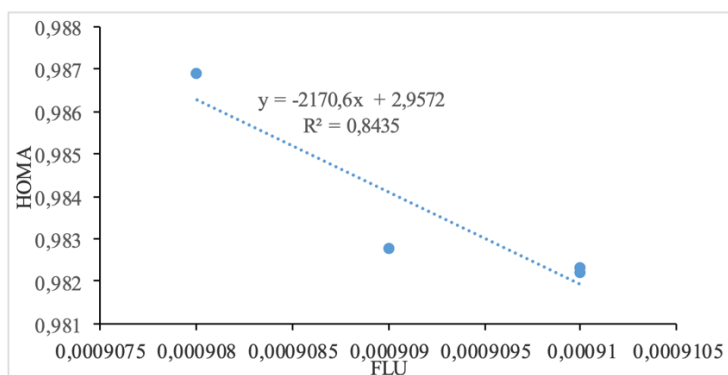


Figure 2. HOMA-FLU Relationship of The Phenyl Group in The BEN Compound in Gas, n-octanol, DMF and Water Phases

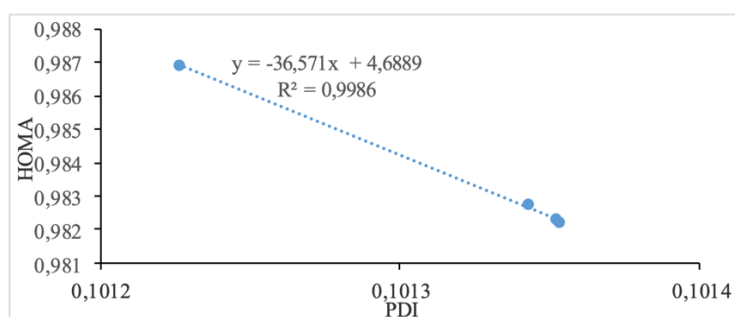


Figure 3. HOMA-PDI Relationship of The Phenyl Group in The BEN Compound in Gas, n-octanol, DMF and Water Phases

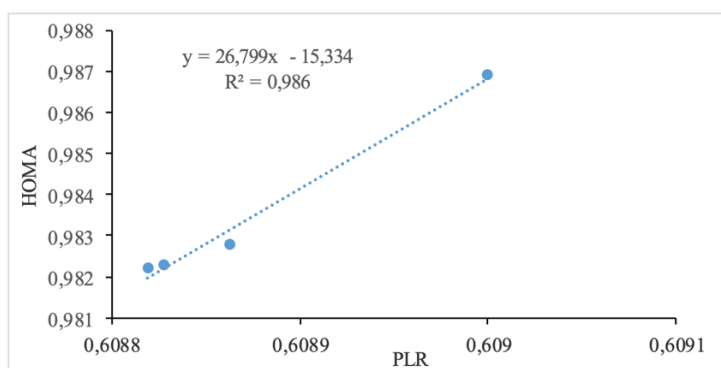


Figure 4. HOMA-PLR Relationship of The Phenyl Group in The BEN Compound in Gas, n-octanol, DMF and Water Phases

In compound BEN, the correlation coefficient between HOMA values and FLU, PDI and LPR for the phenyl group was found to be 0,8435, 0,9986 and 0,986, respectively, and for the nitrophenyl group, 0,9996, 0,9994 and 0,9994, respectively. The close similarity between them can be partially attributed to the fact that FLU was created to some extent follow the HOMA philosophy, that is, to measure aromaticity by comparing it with the values of an aromatic substance (Pasban et al., 2016). NBO analysis is an effective method used to study intra- and intermolecular bonding, conjugate interactions and charge transfer. The larger the E_2 value, the stronger the interaction between the electron donor and electron acceptor. Delocalization of electron density between electron-filled Lewis-type NBO orbitals and electron-empty non-Lewis orbitals corresponds to a stable acceptor-donor interaction (Foster & Weinhold, 1980). NBO analysis has proven to be an effective tool for the chemical interpretation of hyperconjugative interaction and electron density transfer from the unpaired electron. These changes in electron density are called "delocalization" corrections to the zero-order native Lewis structure, a stabilizing donor-acceptor interaction. It has been used to consider the different quadratic perturbation energies (E_2) between occupied orbitals of one subsystem and unoccupied orbitals of another subsystem, predicting delocalization or hyperconjugation. The stabilization energy associated with delocalization for each donor (i) and acceptor (j) can be calculated from the equation given below:

$$E_2 = \Delta E_{ij} = q_i \frac{F_{ij}^2}{(E_j - E_i)} \quad (1)$$

q_i , E_i F_{ij} indicate donor orbital occupancy, diagonal NBO Fock matrix elements, and non-diagonal NBO Fock matrix elements, respectively. Interactions greater than or close to 5 kcal.mol⁻¹ in gas, n-octanol and water environments for molecules of BEN and BENHCl compounds are given in Table 5 and Table S.4. The occupancy rate and hybridization of unshared electron pairs are given in Table 6. The strong intramolecular hyperconjugative interaction of the C33–C36 bond of the compound BEN is formed by the overlap of the π C33–C36 bonding orbital with the π^* O5–N9 antibonding orbital, the π^* C22–C27 antibonding orbital and the π^* C28–C34 antibonding orbital in the gas phase, and the electron density increases by 0,61996, 0,31343, and 0,30309, leading to stabilization energy of 25,06, 20,27, and 16,81 kcal.mol⁻¹, resulting in intramolecular charge transfer leading to stabilization of the molecule. This stabilization energy is 28,53, 28,91 and 28,13 kcal.mol⁻¹ in the interaction of the π C33–C36 bonding orbital and the π^* O5–N9 antibonding orbital in the n-octanol, DMF and water phases, respectively. The overlap of the π C33–C36 bonding orbital and the π^* C22–C27 antibonding orbital is 20,12, 20,11 and 19,95, and the overlap of the π C33–C36 bonding orbital and the π^* C28–C34 antibonding orbital is 16,53, 16,51 and 16,29 (Table 5).

Table 5. Second Order Perturbation Theory Analysis of Fock Matrix in BEN
Compound Based on NBO

| Bonds | Bonding | Bonds | Anti bonding | Occupancy | Gas | n-octanol | DMF | Water |
|---------|----------|---------|--------------|-----------|--------|-----------|--------|--------|
| O2-C18 | π | C17-C21 | π^* | 0,22837 | 4,94 | 4,69 | 4,66 | 4,66 |
| O5-N9 | π | LP(3)O6 | | 1,45495 | 12,37 | 12,11 | 12,09 | 12,09 |
| O5-N9 | π | O5-N9 | π^* | 0,61996 | 7,52 | 7,56 | 7,56 | 7,57 |
| C16-C17 | σ | C21-C26 | σ^* | 0,01851 | 5,41 | 5,21 | 5,18 | 5,39 |
| C16-C20 | σ | C23-C30 | σ^* | 0,01804 | 5,25 | 5,06 | 5,05 | 4,32 |
| C17-C21 | π | O2-C18 | π^* | 0,10065 | 22,28 | 23,86 | 24,07 | 24,11 |
| C19-C25 | π | C24-C31 | π^* | 0,31444 | 19,41 | 19,41 | 19,41 | 19,41 |
| C19-C25 | π | C32-C35 | π^* | 0,32677 | 20,62 | 20,6 | 20,60 | 20,6 |
| C20-C23 | π | O4-C29 | π^* | 0,02368 | 21,44 | 23,27 | 23,47 | 23,51 |
| C22-C27 | π | C28-C34 | π^* | 0,30309 | 20,48 | 20,39 | 20,38 | 20,38 |
| C22-C27 | π | C33-C36 | π^* | 0,38927 | 21,86 | 21,71 | 21,69 | 21,69 |
| C24-C31 | π | C19-C25 | π^* | 0,35134 | 21,48 | 21,32 | 21,30 | 21,41 |
| C24-C31 | π | C32-C35 | π^* | 0,32677 | 20,36 | 20,14 | 20,11 | 20,29 |
| C27-C33 | σ | C33-C36 | σ^* | 0,02368 | 5,43 | 5,47 | 5,47 | 5,53 |
| C28-C34 | π | C22-C27 | π^* | 0,31343 | 19,58 | 19,61 | 19,61 | 19,21 |
| C28-C34 | π | C33-C36 | π^* | 0,38927 | 24,29 | 24,74 | 24,78 | 25,09 |
| C30-H58 | σ | C20-C23 | π^* | 0,21836 | 5,63 | 5,73 | 5,74 | 5,69 |
| C32-C35 | π | C19-C25 | π^* | 0,35134 | 20,08 | 20,03 | 20,02 | 20,11 |
| C32-C35 | π | C24-C31 | π^* | 0,31444 | 20,19 | 20,29 | 20,31 | 20,3 |
| C33-C36 | σ | C27-C33 | σ^* | 0,02371 | 5,55 | 5,6 | 5,60 | 5,63 |
| C33-C36 | π | O5-N9 | π^* | 0,61996 | 25,06 | 28,53 | 28,91 | 28,13 |
| C33-C36 | π | C22-C27 | π^* | 0,31343 | 20,27 | 20,12 | 20,11 | 19,95 |
| C33-C36 | π | C28-C34 | π^* | 0,30309 | 16,81 | 16,53 | 16,51 | 16,29 |
| C34-C36 | σ | N9-C33 | σ^* | 0,10829 | 4,87 | 4,92 | 4,92 | 4,87 |
| C36-H65 | σ | C27-C33 | σ^* | 0,02371 | 4,95 | 4,95 | 4,95 | 4,94 |
| LP(2)O1 | | O2-C18 | π^* | 0,10065 | 42,5 | 44,28 | 44,49 | 42,95 |
| LP(2)O2 | | O1-C18 | σ^* | 0,10019 | 31,42 | 30,22 | 30,07 | 31,16 |
| LP(2)O2 | | C17-C18 | σ^* | 0,05911 | 16,22 | 15,66 | 15,59 | 16,22 |
| LP(1)O3 | | O4-C29 | σ^* | 0,01805 | 6,14 | 6,24 | 6,24 | 6,15 |
| LP(2)O3 | | O4-C29 | π^* | 0,29315 | 44,59 | 45,33 | 45,38 | 44,5 |
| LP(2)O4 | | O3-C29 | σ^* | 0,10065 | 31,85 | 31,02 | 30,95 | 31,92 |
| LP(2)O4 | | C20-C29 | σ^* | 0,06150 | 16,67 | 16,1 | 16,03 | 16,73 |
| LP(2)O5 | | O6-N9 | σ^* | 0,05591 | 18,86 | 18,75 | 18,74 | 19,56 |
| LP(2)O5 | | N9-C33 | σ^* | 0,10829 | 13,13 | 12,53 | 12,48 | 13,42 |
| LP(2)O6 | | O5-N9 | σ^* | 0,05480 | 18,67 | 18,65 | 18,66 | 13,48 |
| LP(2)O6 | | N9-C33 | σ^* | 0,10829 | 13,02 | 12,45 | 12,40 | 14,4 |
| LP(3)O6 | | O5-N9 | π^* | 0,61996 | 161,07 | 157,9 | 157,66 | 137,41 |
| LP(1)N7 | | C12-H42 | σ^* | 0,03746 | 7,95 | 7,81 | 7,79 | 7,96 |
| LP(1)N7 | | C14-H45 | σ^* | 0,03871 | 7,98 | 7,65 | 7,60 | 7,95 |
| LP(1)N7 | | C15-H47 | σ^* | 0,03339 | 7,64 | 7,40 | 7,37 | 7,61 |
| LP(1)N8 | | C17-C21 | π^* | 0,22837 | 36,84 | 38,36 | 38,55 | 7,95 |
| LP(1)N8 | | C20-C23 | π^* | 0,21836 | 35,94 | 38,04 | 38,29 | 36,85 |

Table 6. Hybridization of Unshared Electron Pairs in The BEN Compound

| | Occupancy | Hybridisation | |
|---------|-----------|---------------------|----------------------|
| LP(2)O1 | 1,80995 | p | p(99,96%) |
| LP(2)O2 | 1,85116 | p | p(99,93%) |
| LP(1)O3 | 1,96559 | sp ^{1,56} | s(39,12%), p(60,85%) |
| LP(2)O3 | 1,79534 | p | p(99,95%) |
| LP(2)O4 | 1,84767 | p | p(99,92%) |
| LP(2)O5 | 1,89923 | p | p(99,90%) |
| LP(2)O6 | 1,90029 | p | p(99,90%) |
| LP(3)O6 | 1,45495 | p | p(99,88%) |
| LP(1)N7 | 1,87087 | sp ^{5,94} | s(14,40%), p(85,57%) |
| LP(1)N8 | 1,66339 | sp ^{99,99} | s(0,88%), p(99,12%) |

The strong intramolecular hyperconjugative interaction of the C33–C36 bond of the compound BENHCl is formed by the overlap of the π C33–C36 bonding orbital with the π^* O5–N9 antibonding orbital, the π^* C22–C27 antibonding orbital, and the π^* C28–C34 antibonding orbital. This leads to stabilization energy of 28,13, 19,95 and 16,29 kcal.mol⁻¹ in the gas environment, which results in intramolecular charge transfer that causes stabilization of the molecule.

This results in intramolecular charge transfer resulting in stabilization of the molecule. This stabilization energy is 31,96, 32,39, and 32,47 kcal.mol⁻¹ in the interaction of the π C33–C36 bonding orbital and the π^* O5–N9 antibonding orbital in the octanol, DMF and water phases, respectively, and The overlap of the the π C33–C36 bonding orbital and π^* C22–C27 antibonding orbital was found to be 19,95, 19,95, 19,94 and 19,94, and the overlap of the C33–C36 bonding orbital and the π^* C28–C34 antibonding orbital is found to be 16,07, 16,05 and 16,05 kcal.mol⁻¹, respectively. The overlap of π C28–C34 bonding orbitals with π^* C22–C27 and π^* C33–C36 antibonding orbitals led to 19,21 and 25,09 kcal.mol⁻¹ stabilization in the gas environment, 19,24 and 25,59 kcal.mol⁻¹ in the octanol environment, 19,23 and 25,62 kcal.mol⁻¹ in DMF medium and 19,23 and 25,63 kcal.mol⁻¹ in water (Table S.4).

According to the NBO analysis of the BEN compound in the gas phase, the second of the unshared electron pairs of the O atoms has a p character. The unshared first electron pair of the O3 atom has sp^{1,56} character. The third unshared electron pair of the O6 atom has p character. The hybridization of the first unshared electrons of N7 and N8 atoms is sp^{5,94} and sp^{99,99}, respectively, and their occupancy is 1,87087 and 1,66339. Unshared electron pairs cause strong stabilization (Table 6). Therefore, p orbitals, which are unshared electron pairs, interact by donating electrons to the orbitals opposite the bond. The strongest stabilization energy was seen in the LP(3)O6 → π^* O5–N9 interaction, where the electron density increased by 0,61996 and the stabilization energy was found to be 161,07 kcal.mol⁻¹. The stabilization energy calculated in n-octanol, DMF and water phases were 157,9, 157,66 and 137,41 kcal.mol⁻¹, respectively, and as the dielectric coefficient of the medium increased, the stabilization energy decreased.

In the interaction of $LP(2)O6 \rightarrow \sigma^*O5-N9$ and $\sigma^*N9-C33$, the electron density increased by 0,05480 and 0,10829 and the stabilization energy became 18,67 and 13,02 kcal.mol⁻¹. Calculated stabilization energies in the n-octanol, DMF and water phase in the $LP(2)O6 \rightarrow \sigma^*O5-N9$ interaction are 18,65, 18,66 and 13,48 kcal.mol⁻¹, respectively. In the $LP(2)O6 \rightarrow \sigma^*N9-C33$ interaction, the stabilization energies calculated in n-octanol, DMF and gas phase are 12,45, 12,40, 14,4 kcal.mol⁻¹, respectively.

NLO effects arise from the interactions of electromagnetic fields in various environments (Sun et al., 2009). NLO is at the forefront of current research due to its importance in providing essential functions such as frequency shifting, optical modulation, optical switching, optical logic, and optical memory for emerging technologies in areas such as telecommunications, signal processing, and optical interconnects (Andraud et al., 1994; Geskin et al., 2003; Dege et al., 2013).

In order to investigate the relationships between molecular structures and NLO properties, the dipole moment, polarizability and first-order hyperpolarizability of the BEN compound, in gas, n-octanol, DMF and water media was calculated with B3LYP functional and 6-311G(d,p), 6-311++G(d,p) and 6-311++G(2d,2p) and for BENHCl only 6-311G(d,p) was used.

The electric dipole moment, a vector quantity significantly affected by molecular symmetry and flexibility, characterizes both the magnitude and direction of electric charge separation within the molecule and is equal to the vector sum of the electric dipole moments of the individual bonds. If there is perfect symmetry in a molecule's structure and charge distribution, individual bond moments will cancel each other, causing the overall dipole moment to disappear. However, if the molecule is not symmetrical, the dipole moment increases, reflecting the increased charge separation within the molecule.

The dipole moment of the compound BEN, in the gas, n-octanol, DMF, and water phase calculated with B3LYP functional and basis sets 6-311G(d,p), 6-311++G(d,p), 6-311++G(2d,2p), and the dipole moment of the compound of the BENHCl compound calculated in the gas, n-octanol, DMF, and water phases with the B3LYP functional and 6-311G(d,p) basis set are given in Figure 5.

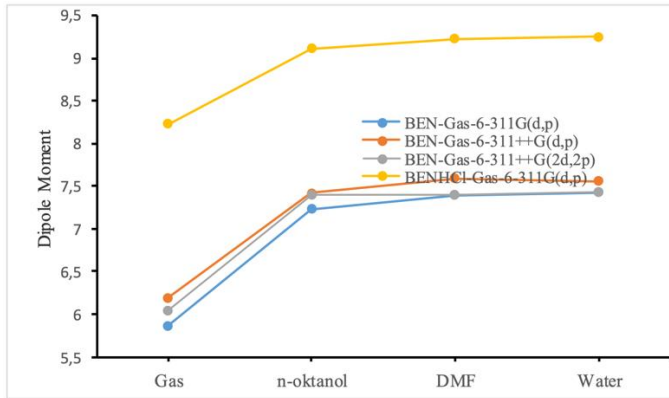


Figure 5. Dipole Moment Values of The Compound BEN and BENHCl in Debye Units

As seen in Figure 5 the dipole moment (μ) of the BEN compound varies depending on the basis set used (Alhanzal et al., 2023). The fact that the dipole moment value of the BENHCl compound is higher than the dipole moment value of the BEN compound shows that it affects the charge distribution of the HCl group.

The dipole moment values of the BEN molecule when we pass from gas to n-octanol, from gas to DMF and from gas to water, increases 1,37 (23,29%) respectively; 1,53 (20,72%), 1,57 (26,70%), respectively, while that of the BENHCl molecule increases to 0,89 (10,79%), 1,00 (10,86%) 1,03 (12,47%), respectively.

The polarizability, kappa and anisotropic polarizability of the compound BEN, in the gas, n-octanol, DMF, and water phase calculated with B3LYP functional and basis sets 6-311G(d,p), 6-311++G(d,p), 6-311++G(2d,2p), and the dipole moment, the polarizability, kappa and anisotropic polarizability of the compound of the BENHCl compound calculated in the gas, n-octanol, DMF, and water phases with the B3LYP functional and 6-311G(d,p) basis set are given in Figure 6-Figure 8.

The response of a system to an applied electric field is called polarizability. They determine not only the strength of molecular interactions (long-range intermolecular induction, dispersion forces, etc.) and the cross-sections of different scattering and collision processes, but also the nonlinear optical properties of the system (Safronova et al., 2015).

From Figure 6, it was found that the polarizability of BEN and BENHCl compounds changed with the addition of the solvent phase. Additionally, there is a visible change in the polarization values of both molecules from the gas phase to the solvent phase.

The polarizability of atoms and molecules and the concepts of hardness and softness are closely linked. It is assumed that softness and polarizability are related. Soft molecules can be polarizable more easily. The fact that the polarizability value of the BENHCl compound is higher than the polarizability value of the BEN compound means that the BENHCl compound is softer.

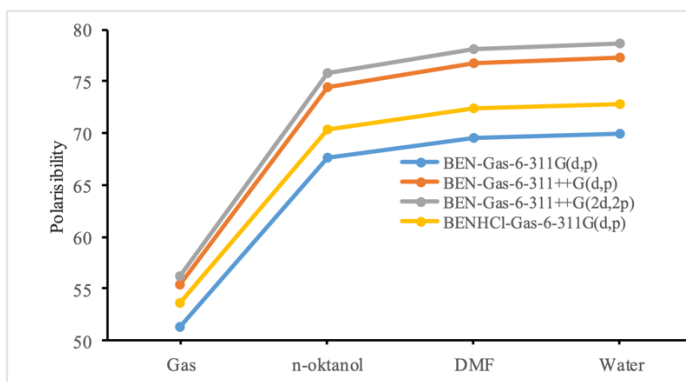


Figure 6. Polarisability Values of The Compound BEN and BENHCl (10^{-24} esu)

Calculated polarizability for BEN and BENHCl in different basis sets shows that the polarizability gradually increases as we go from lower dielectric constant to higher dielectric constant that supports that as the polarity of the solution increases, the reactivity of the molecule increases, and this is due to the fact that HOMO and LUMO orbitals are affected differently in solvents with different dielectric coefficients (Khan et al., 2017).

Both isotropic polarization and anisotropy are used to understand how functional groups act as sources of linear optical responses. It is used to determine how they interact with each other in a way that strengthens the macroscopic optical behavior within the material and how non-covalent interactions such as covalent bonds and hydrogen bonds determine refractive indices and birefringence (Liu & Ueda, 2009; Jose et al., 2023).

The anisotropy of BEN and BENHCl molecules increased in the transition from the gas phase to the solvent phase. In the calculations made with the 6-311G(d,p) basis set, this increase was found to be 31,98% in the BEN molecule and 31,35% in the BENHCl molecule.

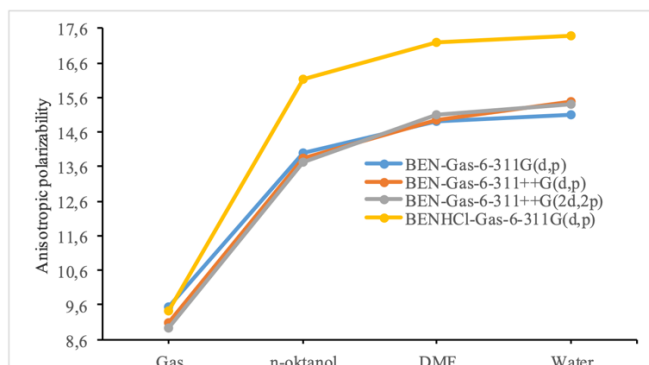


Figure 7. Anisotropic Polarizability Values of The Compound BEN and BENHCl

Kappa values give a measure of deviations from spherical symmetry. In a spherically symmetric charge distribution, the Kappa value will be zero (Hincliffe et al., 2004). Kappa values calculated in gas, n-octanol, DMF and water phases are given in Figure 7.

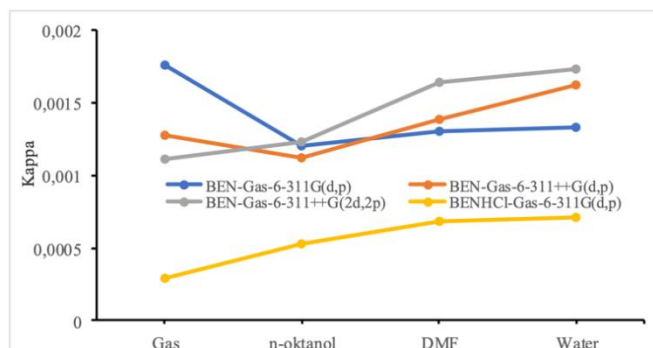


Figure 8. Kappa Values of The Compound BEN and BENHCl

Calculation results showed that both BEN and BENHCl compounds had high hyperpolarization values. The hyperpolarizability value of the carbamide molecule was found to be $0,1944 \times 10^{-30}$ esu and in the calculation made with the 6-311G(d,p) basis set for those of BEN and BENHCl compound were found as $1,146$ and $6,341 \times 10^{-30}$ esu, respectively, (Figure 9).

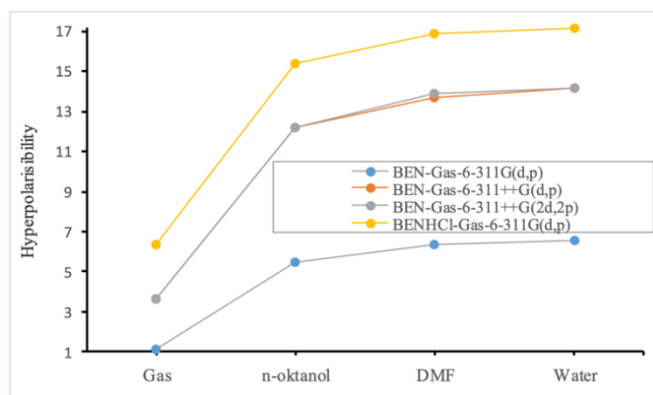


Figure 9. Hyperpolarisibility Values of The Compound BEN and BENHCl

These values are 10 times higher than the hyperpolarizability values of carbamide. Therefore, it has a good NLO feature. The hyperpolarizability values of the BENHCl compound are greater than the hyperpolarizability values of the BEN compound. The magnitude of hyperpolarizations depends on the chemical reactivity and structural properties of the molecule. The large value of the first hyperpolarizability (β), a measure of nonlinear optical activity, is attributed to the intramolecular charge transfer that occurs due to the movement of the electron cloud from the electron donor to the

acceptor groups through a π -conjugated framework (Chen et al., 2014; Varghese et al., 2019).

3. CONCLUSION

The aromaticity of BEN and BENHCl compounds were evaluated indices of aromaticity such as HOMA, BIRD, PDI, PLR, NLO and FLU. NBO calculations reveals that BEN and BENHCl compounds have types of interactions like $\sigma \rightarrow \sigma^*$, $\pi \rightarrow \pi^*$, $\sigma \rightarrow \pi^*$ and lone pair of O and N atoms $\rightarrow \pi^*$. Dipole moment, polarizability, anisotropic polarizability, and hyperpolarisability values of the BENHCl compound is found higher than the polarizability value of the BEN compound. Dipole moment, polarizability, anisotropic polarizability, and hyperpolarisability values vary depending on the basis set used.

Authorship Contributions

All authors contributed to the study conception and design. Material preparation, data collection and analysis were performed by FK and DHT. The first draft of the manuscript was written by FK, DHT and FG and all authors commented on previous versions of the manuscript. All authors read and approved the final manuscript. All authors reviewed the manuscript.

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

- Alhanzal, F., Joudieh, N., Hussein, K., & Chamoun, N. (2023). Comparison between pbe-d3, b3lyp, b3lyp-d3 and MP2 methods for quantum mechanical calculations of polarizability and ir-nmr spectra in C24 isomers, including a novel isomer with D2d symmetry. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 36, 101036. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2023.101036>
- Andraud, C., Brotin, T., Garcia, C., Pelle, F., Goldner, P., Bigot, B., & Collet, A. (1994). Theoretical and experimental investigations of the nonlinear optical properties of vanillin, polyvanillin, and bisvanillin derivatives. *Journal of the American Chemical Society*, 116(5), 2094-2102. <https://doi.org/10.1021/ja00084a055>.
- Chen, X., Jia, C., Wan, Z., Zhang, J., & Yao, X. (2014). Theoretical investigation of phenothiazine-triphenylamine-based organic dyes with different π spacers for dye-sensitized solar cells. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 123, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.12.072>

- Dege, N., Şenyüz, N., Batı, H., Günay, N., Avcı, D., Tamer, Ö., & Atalay, Y. (2014). The synthesis, characterization and theoretical study on nicotinic acid [1-(2,3-dihydroxyphenyl)methylidene]hydrazide. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 120, 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.10.030>
- Edim, M. M., Enudi, O. C., Asuquo, B. B., Louis, H., Bisong, E. A., Agwupuye, J. A., Chioma, A. G., Odey, J. O., Joseph, I., & Basse, F. I. (2021). Aromaticity indices, electronic structural properties, and fuzzy atomic space investigations of naphthalene and its aza-derivatives. *Heliyon*, 7(2), e06138. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06138>.
- Foster, J. P., & Weinhold, F. (1980). Natural hybrid orbitals. *Journal of the American Chemical Society*, 102(24), 7211-7218. <https://doi.org/10.1021/ja00544a007>
- Gajda, Ł., Kupka, T., & Broda, M. A. (2018). Solvent impact on the planarity and aromaticity of free and monohydrated zinc phthalocyanine: *A theoretical study*. *Structural Chemistry*, 29(3), 667-679. <https://doi.org/10.1007/s11224-017-1063-3>
- Geskin, V. M., Lambert, C., & Brédas, J. (2003). Origin of high second- and third-order nonlinear optical response in Ammonio/Borato Diphenylpolyene Zwitterions: the remarkable role of polarized aromatic groups. *Journal of the American Chemical Society*, 125(50), 15651-15658. <https://doi.org/10.1021/ja035862p>.
- Gopika, V.C., Remi, S.L (2018). Validated UV spectrophotometric method for simultaneous estimation of metoprolol succinate and benidipine hydrochloride in their combined tablet dosage form, *Asian Journal of Pharmaceutical and Health Sciences* (8), 1968-1975.
- Hinchliffe, A., Nikolaidi, B., & Soscún Machado, H. (2004). Density functional studies of the dipole Polarizabilities of substituted stilbene, Azoarene and related push-pull molecules. *International Journal of Molecular Sciences*, 5(8), 224-238. <https://doi.org/10.3390/i5050224>
- Khan, M. F., Rashid, R. B., Rahman, M. M., Faruk, M. A., Rahman, M. M., & Rashid, M. A. (2017). Effects of solvent polarity on solvation free energy, dipole moment, polarizability, hyperpolarizability and molecular reactivity of aspirin. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 9(2), 217. <https://doi.org/10.22159/ijpps.2017v9i2.15853>.
- Kruszewski, J., & Krygowski, T. (1972). Definition of aromaticity basing on the harmonic oscillator model. *Tetrahedron Letters*, 13(36), 3839-3842. [https://doi.org/10.1016/s0040-4039\(01\)94175-9](https://doi.org/10.1016/s0040-4039(01)94175-9)
- Krygowski, T. M. J. Chem. Inf. Comput. Sci. 1993, 33, 70-78.

- Krygowski, T., Cyrański, M., Czarnocki, Z., Häfelinger, G., & Katritzky, A. R. (2000). Aromaticity: A theoretical concept of immense practical importance. *Tetrahedron*, 56(13), 1783-1796. [https://doi.org/10.1016/s0040-4020\(99\)00979-5](https://doi.org/10.1016/s0040-4020(99)00979-5).
- Liu, J., & Ueda, M. (2009). High refractive index polymers: Fundamental research and practical applications. *Journal of Materials Chemistry*, 19(47), 8907. <https://doi.org/10.1039/b909690f>
- Matito, E., Duran, M., & Solà, M. (2004). The aromatic fluctuation index (FLU): A new aromaticity index based on electron delocalization. *The Journal of Chemical Physics*, 122(1). <https://doi.org/10.1063/1.1824895>
- Pasban, S., Raissi, H., & Mollania, F. (2016). Solvent effects on the structural, electronic properties and intramolecular N–H O hydrogen bond strength of 5-aminomethylene-pyrimidine-2,4,6 trion with DFT calculations. *Journal of Molecular Liquids*, 215, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.11.038>
- Poater, J., Fradera, X., Duran, M., & Solà, M. (2003). An insight into the local Aromaticities of polycyclic aromatic hydrocarbons and fullerenes. *Chemistry – A European Journal*, 9(5), 1113-1122. <https://doi.org/10.1002/chem.200390128>.
- Reed, A. E., Curtiss, L. A., & Weinhold, F. (1988). Intermolecular interactions from a natural bond orbital, donor-acceptor viewpoint. *Chemical Reviews*, 88(6), 899-926. <https://doi.org/10.1021/cr00088a005>
- Rodrigues, J. L., Ligorio, R. F., Krawczuk, A., Diniz, R., & Dos Santos, L. H. (2023). Distributed functional-group polarizabilities in polypeptides and peptide clusters toward accurate prediction of electro-optical properties of biomacromolecules. *Journal of Molecular Modeling*, 29(2). <https://doi.org/10.1007/s00894-023-05451-5>.
- Safronova, M. S., Mitroy, J., Clark, Charles W., Kozlov, M. G., (2015). AIP Conference Proceedings [AIP Publishing LLC Proceedings of The International Conference of Computational Methods in Sciences And Engineering 2010 (ICCMSE-2010) - Kos, Greece (3–8 October 2010)] - *Atomic polarizabilities*. 1642, 81–89. doi:10.1063/1.4906633.
- Seino, H., Miyaguchi, S., Yamazaki, T., Ota, S., Yabe, R., & Suzuki, S. (2007). Effect of Benidipine hydrochloride, a long-acting T-type calcium channel blocker, on blood pressure and renal function in hypertensive patients with diabetes mellitus. *Arzneimittelforschung*, 57(08), 526-531. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1296643>
- Tuncel, D. H., & Kandemirli, F. (2024). Theoretical study of benidipine and benidipine hydrochloride. *International Journal of Pharmacology and Pharmaceutical Research*, 6(1), 47-56. <https://doi.org/10.33545/26647184.2024.v6.i1a.31>

- Varghese, A. L., Abraham, I., & George, M. (2019). Structural dependence of non-linear optical properties of molecules containing naphthalene linked to Nitrophenyl Group–A DFT study. *Asian Journal of Chemistry*, 31(3), 505-509. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2019.21557>



ŞEHİR ŞEBEKE SULARINDA BULUNAN BAZI AĞIR METAL DÜZEYLERİNİN TAYİNLERİ İÇİN YÖNTEM GELİŞTİRME: İSPARTA İLİ ÖRNEĞİ*

METHOD DEVELOPMENT FOR DETERMINATION OF SOME HEAVY METAL LEVELS IN CITY NETWORK WATER: AN EXAMPLE OF ISPARTA PROVINCE

Ahmet Hakan AKTAŞ¹

İlknur GENÇER²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1522911>

*Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)*
hakanaktas@sdu.edu.tr

*Geliş Tarihi
(Received)*
26.07.2024

*Revizyon Tarihi
(Revised)*
11.10.2024

*Kabul Tarihi
(Accepted)*
14.10.2024

Öz

Şehir içme sularında bulunan olası bazı ağır metaller, sularda yüksek oranlarda bulduklarında, canlılar için zararlı etkilerde bulunabilmektedir. Isparta içme suları örneğinde yapılan bu çalışmanın amacı, şehir içme sularında bulunabilecek bakır, demir ve kadmiyum gibi ağır metallerin bir ligand ile kompleks alınarak, oluşturulacak bu komplekslerin UV-görünür bölge spektroskopisinde analizlerini yapmak ve elde edilen verilere en küçük kareler kalibrasyon yöntemini (PLS) uygulamaktır. Öncelikle kalibrasyon derişim seti 32 adet olacak şekilde hazırlanarak çalışılan ağır metallerin arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Takiben 15 adet validasyon seti hazırlanarak sonuçların uygun olup olmadığını belirlenmiştir. UV-görünür spektrofotometresinden elde edilen sayısal verilerin değerlendirilmesi de güçlü bir kemometrik yöntem olan PLS ile yapılmış ve doğru, hassas ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağır metaller, UV-görünür bölge spektroskopisi, en küçük kareler kalibrasyon yöntemi.

Abstract

Some possible heavy metals found in city drinking water can have harmful effects on living things when they are found in high amounts in water. The aim of this study, conducted on the Isparta drinking water sample, is to complex heavy metals such as copper, iron and cadmium, which may be found in city drinking water, with a ligand, to analyze these complexes in UV-visible region spectroscopy and to apply the least squares calibration method (PLS) to the data obtained. First of all, the calibration concentration set was prepared as 32 pieces and the relationships between the heavy metals studied were determined. Subsequently, 15 validation sets were prepared and it was determined whether the results were appropriate or not. The evaluation of the numerical data obtained from the UV-visible spectrophotometer was made with PLS, a powerful chemometric method, and accurate, sensitive and reproducible results were obtained.

Keywords: Heavy metals, UV-vis spectrophotometry, partial least square calibration method.

*Bu yayın İlknur GENÇER isimli öğrencinin Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimler Fakültesi, Kimya Bölümü, Isparta, Türkiye. hakanaktas@sdu.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-2327-4031.

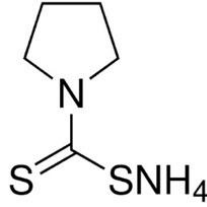
² Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye. ilk16nur@gmail.com, Orcid.org/0000-0003-2688-8418.

1. GİRİŞ

İçme suyu politikaları ve araştırmaları birbiriyle yakından bağlantılıdır. İçme suyundaki toksik ürünlerin tanımlanması ve kontrol edilmesinde son 25 yılda kaydedilen bilimsel ilerlemeler sayesinde düzenlemeler, halk sağlığının su kaynaklı hastalıklardan korunmasını büyük ölçüde iyileştirecek şekilde geliştirildi (Quevauviller & Thompson, 2006). Günümüzde içme suyunun kalite kontrolü büyük önem taşımaktadır. İçme suyu üretimi için genellikle yüzey suyu veya yeraltı suyu alımları kullanılmaktadır. İyi ve güvenli içme suyu sadece hijyen gerekliliklerini karşılamamalı, aynı zamanda lezzetli, temiz, tortu ve kötü koku içermemelidir. İçme suyunda üç ana kirletici bulunmaktadır. Bunlar, suyun dağıtım ve depolanması ile su arıtma proseslerinden kaynaklanan endüstriyel ve tarımsal kirlilikten kaynaklanırlardır (Utylska ve ark., 2021). Bu kirleticilerin insanlar üzerindeki en önemli zararlarından biri kanser gibi sağlık sorunlarına yol açabilen metaller ve metaloidlerdir. Çinko, demir, selenyum, krom, kobalt, vanadyum veya bakır gibi bazı metaller ve metaloidler, insanların düzgün büyümesi için gerekli elementlerdir ancak bunların vücutta aşırı birikmesi istenmeyen sonuçlara neden olabilir. Gelişen teknoloji ve sanayileşmeyle birlikte Cd, Cu, Pb, gibi elementlerden kaynaklanan çevre kirliliği her geçen gün artarak sadece insan yaşamını değil, diğer tüm canlıları ve bitkileri de tehlikeye atmaktadır. Kentleşme, endüstriyel gelişme ve yoğun trafik koşulları da nehirlerde, okyanuslarda, yeraltında vb. suların ağır metallerle kirlenmesine neden olur (Melek ve ark., 2006, Silva ve ark., 2009, Altundağ ve ark., 2015).

Kurşun, insan vücudunda uzun süreli maruziyetle ciddi sağlık sorunlarına yol açabilen toksik bir ağır metaldir. Normalde vücutta bulunması istenmeyen kurşun, çeşitli nedenlerle (örneğin, çevresel maruziyet, kirliliği su veya yiyecek tüketimi) vücuda girebilir. İnsan vücudundaki kurşun düzeylerinin 25 µg/dL'nin altında olması genellikle ciddi sağlık sorunları oluşturmayacak kabul edilen bir sınırdır. Ancak, bu seviyenin üzerinde kurşun birikimi, özellikle çocuklar için beyin ve sinir sistemi gelişimini olumsuz etkileyebilir ve yetişkinlerde ise böbrek hasarı, yüksek tansiyon gibi problemlere neden olabilir. Bundan daha fazla kurşun birikmesi durumunda kurşun zehirlenmesi denen olay meydana gelebilir ve bu da istenmeyen bir çok kötü sonuçlar doğurabilir (Demir ve ark., 2014). Bakır, hayati öneme sahip bir mineral olduğundan tüm canlılar hayatlarını sürdürebilmek için bakıra gereksinim duyarlar. Normal bir yetişkinde yaklaşık 50-120 mg bakır bulunur (Johnson & Larry, 2008). İnsan vücudunda bakır özellikle kas, kemik ve karaciğerde bulunur (Bremner & Beattie, 1995). Kadmiyumun vücuda havadan solunum yoluyla, besinlerle ve sigara ile girdiği tespit edilmiştir (Boğa, 2007). İçme suyundan alınabilecek olan değer ise maksimum 0,006 mg/mL dir (Hayes, 1997).

Bu çalışmada, içme suyunda bulunabilecek bazı ağır metallerin belirlenmesi amacıyla amonyum pirolidin ditiyokarbamat (APDC) şelatlayıcısı kullanılmıştır. APDC'nin amacı incelenen metallerin katı fazını oluşturmak ve metal iyonları ile kararlı yapılar oluşturmaktır. Bu nedenle şelatlayıcı olarak kullanılan APDC ile Pb, Cu ve Cd metallerinin kompleksleri oluşturulmuş ve geri kazanımları incelenmiştir. APDC (amonyum pirolidin ditiyokarbamat, C₅H₁₂N₂S₂, 165 g/mol), Şekil 1'de görüldüğü gibi kükürde bağlı amin grubu aracılığıyla metal iyonları ile kompleksler oluşturabilen güçlü anti-oksidasyona sahip bir şelatdır. Bu özelliği ile yaygın olarak kullanılmaktadır (Malissa & Schöeffmann, 1955).



Şekil 1. APDC'nin Kimyasal Yapısı

İçme suyunda bulunan ağır metal iyonlarının insan sağlığı üzerindeki olası zararlı etkileri ve ek çevresel toksisite nedeniyle, bu tür potansiyel zararlı metallerin tespitine yönelik hassas, basit ve tekrarlanabilir analitik yöntemlerin geliştirilmesi önemlidir. Bu amaçla bakır, kurşun ve kadmiyumun kombine tayini için literatürü araştırdığımızda pek çok yöntem dikkatimizi çekmektedir. Bunlar arasında atomik absorpsiyon spektrofotometrisi (AAS) (Bagheri ve ark., 2012), ICP- OES (Smirnova ve ark., 2021), elektrokimyasal sensör (Zhang ve ark., 2023) ve spektrometri (Vukovic ve ark., 2007) yer alır.

Son yıllarda kemometrik çalışmalarda yaşanan gelişmeler, karşılaştığımız karmaşık sistemleri kolaylıkla çözebilecek çok değişkenli kalibrasyonların geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yöntemlerle birden fazla bileşen içeren numunelerdeki bileşenler, birçok dalga boyu (Martens & Naes, 1992) kullanılarak niceliksel olarak kolaylıkla belirlenebilmektedir. Bu çalışmanın amacı aynı ortamda bulunan bazı ağır metal iyonlarının bir arada kompleks oluşturarak tespit edilmesidir. Ağır metallerin bireysel tespitlerinde, ayırma ve maskeleye sırasında matris ortamında bulunabilecek türlerin bir kısmı analite en azından kısmen benzerdir ve ayırma işlemi sırasında bir miktar analit ortamdan uzaklaştırılabilir. Böyle durumlarda hata yapma gerçeğiyle karşı karşıya kalılabilmektedir (Zarei ve ark., 2006). Dolayısıyla çalışmalarda üzerinde durulan metallerin bir arada olduğu sentetik matris ortamları oluşturulmuş ve güçlü bir kemometrik yöntem olan en küçük kareler kalibrasyon yöntemi kullanılarak herhangi bir ön ayırım yapılmadan bunların tespiti başarıyla yapılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Kullanılan Çözeltiler

Deneylerde (Gençer, 2023) analitik saflıkta kimyasallar kullanıldı. Kullanılan maddeler kurşun asetat trihidrat, kadmiyum asetat dihidrat ve bakır nitrat trihidrat bakır (II) nitrat, pH çalışmalarında kullanılan hidroklorik asit, potasyum klorür, asetik asit, sodyum asetat, amonyum klorür ve amonyak maddeleri Merck ve Aldrich markalarının saf maddeleridir. Tüm maddelerin stok çözeltileri 100 ppm olarak hazırlandı ve bu maddeler esas alınarak deneyler yapıldı. 2g APDC tartıldı ve 100 mL'ye tamamlanacak şekilde az miktarda metanol içerisinde çözüldü.

2.2. Cihaz

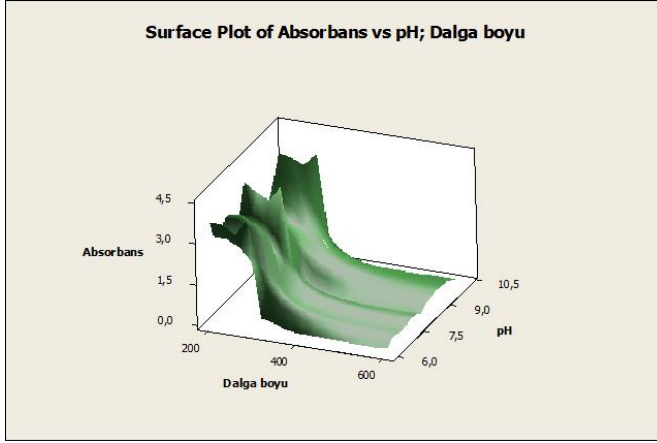
Çalışmada hazırlanan çözeltilerin spektrumları UV 1700 PHARMASPEC SHIMADZU cihazında elde edildi. Elde edilen spektrum değerleri içme suyundaki bakır, kurşun ve kadmiyum miktarlarının belirlenmesine ve sonuçların kemometrik olarak değerlendirilmesine yardımcı oldu.

2.3. Deneysel Yöntem

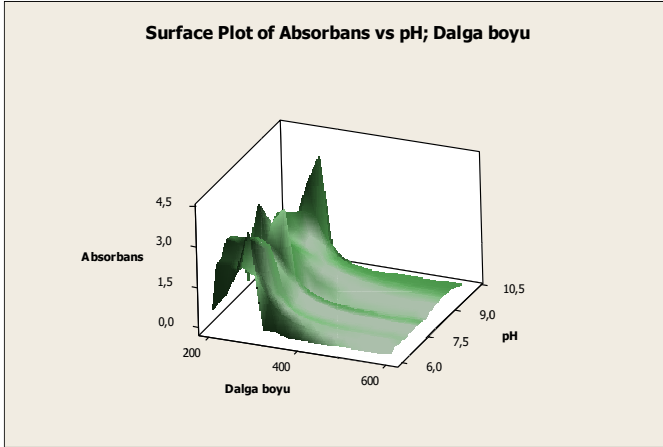
Çalışmada öncelikle oluşturulacak komplekslerin en uygun parametre çalışmaları yapılarak optimum koşullar sağlandı. Takiben metallerin spektrumları önce bireysel, daha sonra da karışımlar hazırlanarak alındı. Spektrumlardan alınan veriler PLS kalibrasyon yöntemi ile değerlendirildi. Bu işlem sırasında stoklardan derişimleri 2-10 ppm aralığında hazırlanan metallerin son hacmi 25 mL'ye tamamlanarak çözeltiler hazırlandı ve spektrumları alındı. Daha sonra her madde farklı ama birbirine yakın dalga boylarında maksimum verdiği için saf maddelerden oluşturulan sentetik karışımların UV spektroskopisinde absorbans okumaları yapıldı ve maddeler herhangi bir ön ayırmaya gerek kalmadan yan yana incelendi. Son aşamada hazırlanan sentetik numune çözeltileri incelenerek, validasyonu yapılan yöntem su numunelerine başarılı bir şekilde uygulandı.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

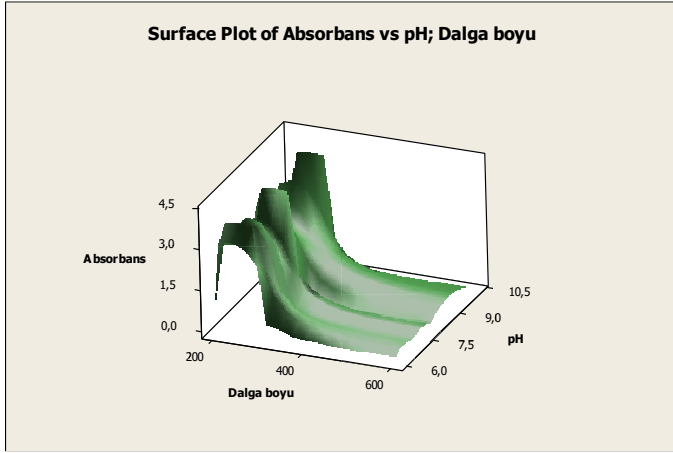
Bu tip çalışmalarda seçilen matriks ortamını en çok etkileyen parametre ortamın pH'sıdır. Her bir metalin APDC ile etkileşmesi, sonucu oluşan komplekslerin davranışını en çok etkileyen pH'dır. Seçilen üç ağır metalin tayinlerinde en uygun pH'yı bulmak için çeşitli pH'larda deneyler yapılmış ve en uygun pH değeri 10,0 olarak tespit edildi. Farklı metallere ve farklı ligandlarla oluşturulan kompleks çalışmalarında bu pH değeri 4,0 (Aktaş & Mutlutürk, 2014) bir başka çalışmada ise pH değeri yine 4,0 olarak bulundu (Kaba & Aktaş, 2014). Kozmetik ürünlerindeki ağır metallerin PAR ligandı ile yaptığı kompleksleri tayin etmek için bulunan en uygun pH değeri de 10,0 olarak bulundu (Aktaş & Aydın, 2016). Bu işlem için pH 6,0 ile 10,0 arasında oluşturulan çözeltilerin yapılan spektrum çalışmalarının grafikleri Şekil 2 ile Şekil 4'de gösterildi. Grafiklerden de görüldüğü üzere en yüksek absorbans değerleri pH 10,0 da görüldüğünden dolayı çalışmanın pH'ı 10,0 olarak kabul edilerek kalibrasyon ve validasyon işlemlerine geçildi.



Şekil 2. Cd²⁺-APDC Kompleks Oluşumunda pH'nın Etkisi



Şekil 3. Pb²⁺-APDC Kompleks Oluşumunda pH'nın Etkisi

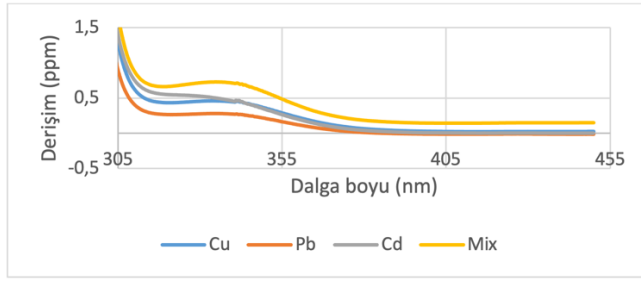
Şekil 4. Cu²⁺-APDC Kompleks Oluşumunda pH'nın Etkisi

Bu işlem tamamlandıktan sonra metal derişimi-absorbans ilişkisi çalışmaları yapıldı. 10 ppm'lik metal çözeltilerinden sırasıyla 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 ve 2,5 pmm alınarak kompleksleştirici ve pH tamponu eklenerek spektrofotometrede spektrum alındı. Tablo 1'de gösterildiği gibi her metal kompleksinin maksimum absorbansı verdiği dalga boyu, kalibrasyon denklemi ve korelasyon katsayısı belirlendi.

Tablo 1. Oluşturulan Metal Komplekslerinin Verileri

| Metal kompleksi | Maksimum absorbans | Kalibrasyon denklemi | Korelasyon katsayısı |
|------------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| Pb ²⁺ -APDC | 339,3 nm | y= 0,0355x+0,1933 | 0,9763 |
| Cu ²⁺ -APDC | 346,2 nm | y= 0,1492x-0,0694 | 0,9926 |
| Cd ²⁺ -APDC | 344,5 nm | y= 0,053x+0,2774 | 0,9870 |

Çalışmada bundan sonraki aşama spektral koşulların optimizasyonu olarak belirlendi. Spektrofotometrik çalışmalarda oluşturulan kompleksler için bu çalışmada en uygun çözücünün 0,1 M HCL çözücüsü olduğuna karar verildi. Pb²⁺-APDC, Cu²⁺-APDC, Cd²⁺-APDC komplekslerinin ve bunlara karşılık gelen karışımların 0,1 M HCL içindeki spektrumları 305-445 nm dalga boyu aralıklarında ölçüldü (Şekil 5). Şekil 5'de görüldüğü üzere her üç bileşimin de aynı dalga boyu aralığında spektrum değerleri verdiği görüldü. Bundan dolayı klasik spektroskopik işlemlerle her üç bileşimin aynı anda miktarının belirlenmesi olası olamayacağından PLS kemometrik yöntem kullanıldı.



Şekil 5. Pb^{2+} -APDC, Cu^{2+} -APDC ve Cd^{2+} -APDC ile Üç Bileşiğe Karşı Gelen Karışımın Absorpsiyon Spektrumları (0,1 M HCl içinde)

Çalışmanın bu aşamasında elde edilen spektroskopik verilere en küçük kareler kalibrasyonu (PLS) yöntemi uygulandı. Bu amaçla PLS yönteminin validasyonu için Pb^{2+} -APDC, Cu^{2+} -APDC, Cd^{2+} -APDC ile 0,25-0,9 ppm çalışma aralığında 15 adet karışım çözeltisi hazırlandı. Bu validasyon seti kullanılarak PLS kalibrasyonu yapıldı. Böylece hassasiyet ve doğruluk test edilerek geri kazanım değerleri hesaplandı. Sentetik karışımlara PLS yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar da Tablo 2'de gösterildi. Aynı yöntem demir, titanyum ve alüminyum örneklerine (Safavi ve ark., 2003) başarı ile uygulandı. Yine PLS yönteminin çeşitli ilaç örneklerine başarı ile uygulandığı birçok çalışma belirlendi (Pektaş ve ark., 2008; Dinç & Baleanu, 2002).

Tablo 2. PLS Yönteminin Geri Kazanma Değerleri

| Karışım | | | Bulunan | | | Geri Kazanım (%) | | |
|----------|------|------|---------|-------|-------|------------------|---------|---------|
| Pb | Cu | Cd | Pb | Cu | Cd | Pb | Cu | Cd |
| 0,25 | 0,10 | 0,60 | 0,239 | 0,104 | 0,643 | 95,680 | 104,880 | 107,308 |
| 0,25 | 0,20 | 0,60 | 0,260 | 0,208 | 0,644 | 104,111 | 104,216 | 107,491 |
| 0,25 | 0,30 | 0,60 | 0,247 | 0,293 | 0,602 | 99,010 | 97,885 | 100,360 |
| 0,25 | 0,40 | 0,60 | 0,261 | 0,384 | 0,593 | 104,654 | 96,227 | 98,956 |
| 0,25 | 0,50 | 0,60 | 0,242 | 0,482 | 0,613 | 97,048 | 96,527 | 102,298 |
| 0,25 | 0,25 | 0,10 | 0,266 | 0,255 | 0,105 | 106,503 | 102,236 | 105,882 |
| 0,25 | 0,25 | 0,30 | 0,235 | 0,247 | 0,291 | 94,114 | 98,962 | 97,266 |
| 0,25 | 0,25 | 0,50 | 0,268 | 0,244 | 0,479 | 107,444 | 97,710 | 95,216 |
| 0,25 | 0,25 | 0,70 | 0,265 | 0,263 | 0,671 | 106,317 | 105,322 | 95,915 |
| 0,25 | 0,25 | 0,90 | 0,251 | 0,247 | 0,897 | 100,577 | 99,137 | 99,755 |
| 0,10 | 0,25 | 0,60 | 0,102 | 0,251 | 0,595 | 102,547 | 100,544 | 99,267 |
| 0,20 | 0,25 | 0,60 | 0,207 | 0,248 | 0,592 | 103,963 | 99,438 | 98,736 |
| 0,30 | 0,25 | 0,60 | 0,298 | 0,252 | 0,613 | 99,643 | 101,050 | 102,262 |
| 0,40 | 0,25 | 0,60 | 0,379 | 0,251 | 0,576 | 94,969 | 100,720 | 96,013 |
| 0,50 | 0,25 | 0,60 | 0,489 | 0,264 | 0,593 | 97,827 | 105,783 | 98,870 |
| Ortalama | | | | | | 100,960 | 100,715 | 100,420 |
| RSD* | | | | | | 4,456 | 3,175 | 3,903 |

RSD* Standart sapma

En küçük kareler kalibrasyon yönteminde geri kazanımları yüksek bir doğrulukla elde ettikten sonra, uygulanan yöntemin validasyon işlemine sıra geldi. Kemometrik yöntemin validasyonu için en çok başvurulan işlemlerin başında karelerin tahmin hatası toplamı denilen ve PRESS ile gösterilen değer hesaplanır (Otto, 1998). Hesaplanan PRESS değerleri için aşağıda verilen formül kullanıldı.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (C_i^{eklenen} - C_i^{bulunan})^2 \quad (1)$$

Kemometrik kalibrasyonların validasyonu için kalibrasyon ve validasyon adımlarında kalibrasyonun standart hatası → SEC parametresi kullanılır. SEC değerini en aza indiren kalibrasyon koşulları ve F istatistikleri kullanılır. Araştırmada hesaplanan SEC değerleri için aşağıdaki formül kullanıldı.

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i^{eklenen} - C_i^{bulunan})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Burada n sentetik karışımların toplam sayısıdır. Bulunan sayısal değerlerin sıfıra yakınlığı uygulanan yöntemin doğruluğunun göstergesidir (Kramer, 1998). PLS kalibrasyonuna ilişkin validasyon tahmini ve istatistiksel veriler Tablo 3'de gösterildi.

Tablo 3. PLS Yönteminin İstatistiksel Analiz Sonuçları

| Parametre | Pb | Cu | Cd |
|-----------|--------|--------|--------|
| PRESS | 0,0001 | 0,0076 | 0,0004 |
| SEC | 0,0118 | 0,0087 | 0,0206 |
| r | 0,9831 | 0,9943 | 0,9854 |
| Kesim | 0,0180 | 0,0201 | 0,0029 |
| Eğim | 0,9368 | 0,9252 | 0,9967 |

PLS kalibrasyon yönteminin doğruluğunu ve kesinliğini test etmek amacıyla elde edilen verilere ANOVA testi (Akyıldız, 2009) uygulandı. ANOVA testinde F-hesaplanan<F-tablosu ve p-değeri>p=0,05 olduğundan %95 güven aralığında elde edilen sonuçlar arasında anlamlı bir fark olmadığı tespit edildi. Varyans analizinde iki serbestlik derecesi kullanılır. Gruplar arası serbestlik derecesi = 1 Grup içi serbestlik derecesi = 29. F-hesaplanan<F-tablosu ve p-değeri> p=0,05 olduğundan bu modelin doğal su örneklerinin incelenmesinde kullanılabileceğine karar verildi.

Çalışmada geliştirilen ve validasyon aşamasında yüksek geri kazanım gösteren kemometrik yöntem Isparta şehir suyuna ve Süleyman Demirel Üniversitesi kampüs suyuna uygulanarak aşağıdaki sonuçlar elde edildi. Analizi yapılan su numuneleri kompleks oluşumu için sağlanan optimum koşullar altında UV spektrofotometrede okundu. Ortaya çıkan grafiklerden Isparta Şehir suyu örneği Şekil 6'da, bulunan geri kazanım değerleri de Tablo 4'de gösterildi.



Şekil 6. Şehir Merkezinden Alınan Doğal Su Numunesinin Spektrumu (0.1 M HCl içinde)

Tablo 4. Doğal Su Örneklerinde Bulunan Değerler (Ethic Wate, 2024)

| Kaynak | Pb (ppm) | Cu (ppm) | Cd (ppm) |
|---|----------|----------|----------|
| Isparta şehir suyu | 2,8308 | 0,0084 | 0,0542 |
| Süleyman Demirel Üniversitesi kampüs suyu | 2,7854 | 0,0072 | 0,0528 |
| Dünya Sağlık Örgütü (WHO)* | 10,0000 | 2,0000 | 3,0000 |
| Türk Standartları 266* | 10,0000 | 2,0000 | 5,0000 |
| Sağlık Bakanlığı* | 10,0000 | 2,0000 | 5,0000 |

Tablo 4’ de de görüldüğü gibi, Isparta şehir suyu ve Süleyman Demirel Üniversitesi kampüs suyu analiz sonuçları, Dünya Sağlık Örgütü (WHO), Türk Standartları 266 ve Sağlık Bakanlığı değerleri ile karşılaştırıldığında, elde edilen değerlerin sınır değerlere göre oldukça düşük olduğu gözlemlendi. Hiraide ve Hora tarafından 1999 yılında yapılan çalışmada da benzer sonuçlar elde edildiği görüldü. Bu sonuçlar bize Isparta ili ve Süleyman Demirel Üniversitesi kampüs sularının güvenilirliğini göstermektedir.

Bu çalışma sonucunda uygulanan kemometrik yöntemin Cd^{2+} , Cu^{2+} ve Pb^{2+} karışımlarının analizinde uygun sonuçlar verdiği, uygulanan yöntemlerin ise hassas ve doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, doğal su örneklerinde çevreden ve doğal kaynaklardan kaynaklanması muhtemel üç ağır metalin APDC ligandıyla kompleksleri oluşturularak eş zamanlı spektrofotometrik yöntem önerildi. Önerilen yöntem sonucunda elde edilen verilere en küçük kareler kalibrasyon kemometrik yöntemi başarıyla uygulandı. Önerilen yöntemin birbirine çok yakın absorbans veren ağır metallerin belirlenmesinde doğru ve hassas sonuçlar verdiği belirlendi. Önerilen yöntemin, herhangi bir ön ayırma işlemi gerektirmeden, doğal sularda ağır metallerin belirlenmesinde rutin analizler için son derece uygulanabilir olduğu sonucuna varıldı.

Yazarların Katkısı

Yapılan çalışma bir yüksek lisans çalışması olduğundan, çalışmanın deneysel planlaması 1. yazar tarafından, laboratuvar ortamındaki deneysel çalışmalar ise 2. yazar tarafından yapılmış olup, yazarlar makalenin son halini onaylamışlardır. Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Teşekkür

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı tarafından FYL-2022-8682 nolu proje ile desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığına teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları, aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Aktaş, A.H. & Aydın, Ç. (2016). Spectrometric determination of some heavy metals in cosmetic products found by principal component regression and partial least squares methods. *International Research Journal of Natural and Applied Sciences*, 3(12), 23-34.
- Aktaş, A.H. & Mutlutürk, B. (2014). Demir ve alüminyumun doğal sularda UV spektrofotometrik tayini için yöntem geliştirilmesi ve elde edilen verilerin kemometrik kalibrasyon yöntemleriyle değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(3), 52-59.
- Akyıldız, M. (2009). Tek faktörlü varyans analizi (One-Way Anova) ve bir spss örneği, www.istatistik.gen.tr adresinden 14 Ocak 2024 tarihinde alınmıştır.
- Altundag, H., Albayrak, S., Dundar, M.S., Tuzen, M. & Soylak, M. (2015). Application of wet vs. microwave digestion for trace element determination in soil, vegetable, nuts, and grain samples by ICP-OES. *Atomic Spectroscopy*, 34(2), 159-164.
- Bagheri, H., Afkhami, A., Tehrani, M.S. & Khoshsafar, H. (2012). Preparation and characterization of magnetic nanocomposite of Schiff base/silice/magnetite as a preconcentration phase for the trace determination of heavy metal ions in water, food and biological samples using atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 97,87-95.
- Boğa, A. (2007). Ağır metallerin özellikleri ve etki yolları. *Arşiv*, 16, 218-234.

- Bremner, I. & Beattie, J. (1995). Copper and zinc metabolism in health and disease: speciation and interactions. *Proceedings of the Nutrition Society*, 54(2), 489-499.
- Demir, D., Göktürk, T. & Akçay, O. (2014). Bazı kozmetik ürünlerde ağır metal (Pb, Cd) tayini, *SDU Journal of Science*, 9(2), 194-200.
- Dinç, E. & Baleanu, D. (2002). Spectrophotometric quantitative determination of cilazapril and hydrochlorothiazide in tablets by chemometric methods. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 30, 715-723.
- Ethic Water, (2024). ethicwater.com.tr adresinden 16 Ocak 2024 tarihinde alınmıştır.
- Gençer, İ. (2024). *Isparta ilinin içme suyunda bulunan bazı ağır metallerin kemometrik yöntemlerle belirlenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Hayes, R.B. (1997). The carcinogenicity of metals in humans. *Cadmium. Cancer Causes of Control*, 8(3), 381-385.
- Hiraide, H. & Hora, J. (1999). Enrichment of metal APDC complexes on admicelle coated alumina for water analysis. *Analytical Science*, 15, 1055-1058.
- Johnson, M.D. & Larry, E. (Ed.), (2008). Copper. *Merck Manual Home Health Handbook*. Merck Sharp & Dohme Corp.
- Kaba, A. & Aktaş, A.H. (2014). Çeşitli ligandları kullanarak Fe^{3+} , Al^{3+} ve Cu^{2+} nin bir arada spektrofotometrik tayinleri için yöntem geliştirilmesi ve elde edilen verilerin en küçük kareler kalibrasyon yöntemi (PLS) ve temel bileşen regresyon (PCR) yöntemi ile değerlendirilmesi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(1), 71-79.
- Kramer, R. (1988). Chemometrics Techniques for Quantitative Analysis, *Marcel Dekker*, New York.
- Malissa H. & Schoeffmann E. (1955). Über die Verwendung von substituierten Dithiocarbamaten in der Mikroanalyse. III. *Mikrochimica Acta*, 1, 187-202.
- Martens, H. & Naes, T. (1992). Multivariate calibration. *Wiley*, New York.
- Melek, E. Tüzen, M. & Soylak, M. (2006). Flame atomic absorption spectrometric determination of cadmium(II) and lead(II) after their solid phase extraction as dibenzylidithiocarbamate chelates on Dowex Optitore V-493. *Analytica Chimica Acta*, 578(2), 213-219.
- Otto, M. (1998). *Chemometrics: Statistics and Computer Applications in Analytical Chemistry*, Weinheim, Wiley-VCH.

- Pektaş, G., Dinç, E. & Baleanu D. (2008). Spectrophotometric determination of levamisole and triclabendazole in tablets by principal component regression and partial least squares chemometric methods. *Revista De Chimie*, 59(2), 154-158.
- Quevauviller, P., Thomson, K.C. (Ed.), (2006). Analytical Methods for Drinking Water: Advances in Sampling and Analysis. *John Wiley & Sons. Ltd.*
- Safavi, A., Mizae, M. & Abdollahi, H. (2003). Simultaneous spectrophotometric determination of iron, titanium and aluminium by partial least squares calibration method in micellar medium. *Analytical Letters*, 36(3), 699-712.
- Silva, E.L., Roldan, P.S. & Gine, M.F. (2009). Simultaneous preconcentration of copper, zinc, cadmium and nickel in water samples by cloud point extraction using 4-(2-pyridylazo)-resorcinol and their determination by inductively coupled plasma optic emission spectrometry. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 1133-1138.
- Smirnova, S.V., Ilin, D.V. & Pletnev, I.V. (2021). Extraction and ICP-OES determination of heavy metals using tetrabutylammonium bromide aqueous biphasic system and oleophilic collector. *Talanta*, 221, 121485.
- Utylska, P.P., Muntean, E., Kernert, J. & Michalski, R. (2021). Indexing methods and chemometric analysis of selected metals and metalloids for drinking water quality assessment in Upper Silesia region, Poland. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(4), 1-19.
- Vuković, J., Matsuoka, S., Yoshimura, K., Grdinić, V., Grubešić, R.J., & Županić, O. (2007). Simultaneous determination of traces of heavy metals by solid-phase spectrophotometry. *Talanta*, 71: 2085-2091.
- Zarei, K. Atabati, M. & Malekshabani, Z. (2006). Simultaneous spectrophotometric determination of iron, nickel and cobalt in micellar media by using direct orthogonal signal correction-partial least squares method, *Analytica Chimica Acta*, 556, 247 – 254.
- Zhang, Y., Xu, Y., Li, N., Liu, X., Ma, Y., Siyiyang, H., Luo, C. & Huo, D.H. (2023). An ultrasensitive electrochemical sensor based on antimonene simultaneously detect multiple heavy metal ions in food samples. *Food Chemistry*, 421, 136131.



ELEKTRİKLİ KAMYON SEÇİMİNDE DAİRESEL SEZGİSEL BULANIK KÜMELERE DAYALI VIKOR YÖNTEMİNİN UYGULANMASI

APPLICATION OF VIKOR METHOD BASED ON CIRCULAR INTUITIONISTIC
FUZZY SETS IN SELECTING AN ELECTRIFIED TRUCK

Elif ÇALOĞLU BÜYÜKSELÇUK¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1487934>

*Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)*
elif.buyukselcuk@fbu.edu.tr

*Geliş Tarihi
(Received)*
21.05.2024

*Revizyon Tarihi
(Revised)*
13.09.2024

*Kabul Tarihi
(Accepted)*
17.09.2024

Öz

Artan nüfus ve gelişen küresel tüketici davranışları, dünya çapında kapsamlı ticari etkileşimleri teşvik etti. Ancak bu genişleme çevre kirliliğinin artmasına neden oldu. Sonuç olarak tükeler, özellikle ulaşım ve nakliye faaliyetlerinden kaynaklanan hava kirliliğini azaltmak için önlemler almaya başladı. Bu çabanın bir parçası olarak, fosil yakıt tüketen araçların yerini alan ve hızla yaygınlaşan elektrikli araçlar, uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıktı. Bu çalışma, ulaşım amacıyla kullanılan elektrikli kamyonların seçim konusundaki ikilemlerini incelemektedir. Karar vericilerin seçim sürecinde dikkate alması gereken kriterleri tanımlar ve piyasada mevcut alternatifleri bu kriterlere göre değerlendirir. Karar verme sürecinin doğasında olan belirsizlik ve özellikle mücadele etmek için dairesel sezgisel bulanık sayılar kullanıldı. Alternatiflerin değerlendirilmesinde bu sayılara dayalı VIKOR yöntemi tercih edilen yaklaşım olmuştur. Bu araştırma, sürdürülebilir ulaşım alanındaki kritik bir ihtiyacı ele alıyor ve karar vericilere elektrikli kamyonların önceden tanımlanmış kriterlere göre değerlendirilmesi için sistematik bir çerçeve sağlıyor. Dairesel sezgisel bulanık sayılardan ve VIKOR yönteminden yararlanan bu çalışma, elektrikli kamyon seçiminin doğasında bulunan karmaşıklıkların üstesinden gelmek için sağlam bir metodoloji sunuyor ve böylece hava kirliliğini azaltma ve çevresel açıdan sürdürülebilir ulaşım uygulamalarını teşvik etme çabalarını iletliyor.

Anahtar Kelimeler: VIKOR, dairesel sezgisel bulanık küme, karar verme, elektrikli kamyon, çevre kirliliği.

Abstract

The increasing population and evolving global consumer behaviors have fostered extensive commercial interactions worldwide. However, this expansion has resulted in heightened environmental pollution. Consequently, nations have initiated measures to mitigate air pollution, particularly stemming from transportation and shipping activities. As part of this endeavor, electric vehicles have emerged as a viable solution, steadily replacing fossil fuel-consuming vehicles and experiencing rapid proliferation. This study delves into the selection quandary surrounding electric trucks employed for transportation purposes. It delineates the criteria that decision-makers ought to consider during the selection process and evaluates market-available alternatives against these criteria. To contend with uncertainty and subjectivity inherent in the decision-making process, circular intuitive fuzzy numbers were employed. The VIKOR method, predicated on these numbers, was the preferred approach for assessing the alternatives. This research addresses a critical need in the realm of sustainable transportation, providing decision-makers with a systematic framework for evaluating electric trucks based on predefined criteria. By leveraging circular intuitive fuzzy numbers and the VIKOR method, the study offers a robust methodology for navigating the complexities inherent in selecting electric trucks, thereby advancing efforts to curtail air pollution and promote environmentally sustainable transportation practices.

Keywords: VIKOR, circular intuitionistic fuzzy set, decision making, electric truck, environmental pollution.

¹ Fenerbahçe Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
elif.buyukselcuk@fbu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-5976-6727.

1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri arasında yer alan on üçüncü hedef iklim değişikliği ve etkileri ile mücadele etmek üzere yayınlanmıştır (Waseem ve ark., 2023; United Nations, 2024). Bu hedef ile tüm ülkelerde iklim değişikliği ile ilgili olarak acil eylem planlarının oluşturulması ve iklim değişikliğine neden olan etmenlerin minimize edilmesi veya yok edilmesi gerekmektedir. 29 Mart 2023 yılında Türkiye İstatistik Kurumu tarafından hazırlanan rapora göre toplam sera gazı emisyonu 2021 yılında 564,4 milyon ton karbondioksit (CO₂) eşdeğeridir. Bir önceki yıl ile kıyaslandığında %7,7 oranında artış olmuştur. 1990 yılında kişi başı 4 ton CO₂ eşdeğeri olan değer 2021 yılında 6,7 ton CO₂ eşdeğerine yükselmiştir (TÜİK, 2023). Küresel ısınmaya dolayısıyla iklim değişikliğine neden olan sera gazları miktarının sektörlere göre dağılımı ve hangi gazların hangi oranlarda bulunduğu Şekil 1’de verildiği gibidir.



Şekil 1. Sektörlere ve Gazlara Göre Sera Gazı Emisyon Oranları (TÜİK, 2023)

Şekil 1’den de görüleceği üzere sera gazları özellikle enerji sektöründen (%71,3) kaynaklanmaktadır. Sera gazlarının küçük bir oranı doğal yollarla ortaya çıkarken %90’lık gibi büyük kısmı insanların faaliyetleri sonucunda ortaya çıkmaktadır (Erdoğan, 2020). Bu gazların içerisinde de en fazla olanı karbondioksit gazıdır (CO₂). Enerji sektöründe ise en önemli sera gazının sebebi ise ulaşım amacıyla kullanılan otomobil, midibüs, minibüs, otobüs, kamyonet, kamyon tır, tren ve uçaklardır (Çaloğlu Büyükselçuk & Tozan, 2022; Valavanidis, 2012). 2021 yılında Amerika Birleşik Devletleri’nde, atmosfere salınan sera gazlarının %28’i ulaşım sektöründen kaynaklanmaktadır (Pennington ve ark., 2024). Artan nüfus yoğunluğu, değişen tüketici davranışları, teknoloji ve internetin gelişimi ile küresel ölçekte ticari faaliyetlerin yoğunluğu da artmıştır. Bu faaliyetler sonucunda, 1960 yılında havada birim hacimdeki karbondioksit miktarı 300 ppm iken, bu miktar 2010 yılında 390 ppm’e, 2018 yılında ise 410 ppm’e yükselmiştir. Atmosferde güvenilir karbondioksit yoğunluğu ise 350 ppm olmalıdır. Bu artışta Hindistan, Çin, Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerin katkısı büyüktür (Erdoğan, 2020).

Sera gazlarının artması ile küresel ısınma ve dolayısıyla iklim değişikliğine neden olmakta, bunun sonucunda da insan yaşamı olumsuz yönde etkilenmektedir.

Sürdürülebilir bir dünya için ülkeler sera gazlarının azaltılması amacıyla birtakım önlemler almaya başlamışlardır. Sera gazının artışında önemli bir yeri olan ulaşım araçlarından kaynaklı fosil yakıtların kullanımını ortadan kaldırmak için elektrikli araç kullanım zorunluluğu getirmişlerdir. 2025 yılından itibaren Norveç’te, 2030 yılında

Almanya’da ve bu ülkeleri takiben diğer Avrupa ülkelerinde benzinli ve dizel araçların satışının yasaklanacağı ilan edilmiştir (Shammut ve ark., 2019; Wappelhorst, 2020). Böylece elektrikli araçların kullanımının gerekliliği kaçınılmaz olmuştur. Elektrikli araçların yaygınlaşması ile hedeflenen sıfır CO₂ seviyelerine ulaşılabilecektir (Efendi & Fahmi, 2021).

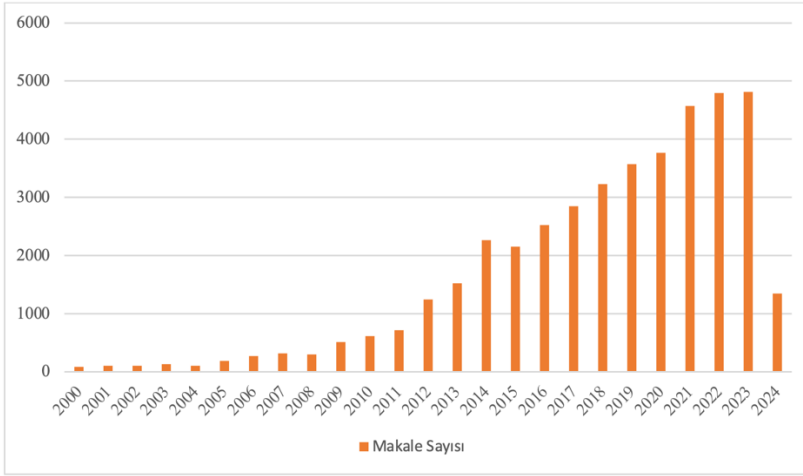
Dünya Sağlık Örgütü tarafından yapılan açıklamaya göre hava kirliliği her yıl 6,7 milyon erken ölüme neden olmaktadır. Ayrıca dünya nüfusunun %99’undan fazlası hava kirliliğinin Dünya Sağlık Örgütü hava kalitesi yönergelerinin üzerinde olduğu bölgelerde yaşamaktadır. Hava kirliliğinin en temel kaynakları arasında ise ulaşım, sanayi, enerji vb. amaçlarla fosil yakıtların kullanımı sonucu açığa çıkan CO₂ gazı gelmektedir (World Health Organization, 2024). Gelişen ve artan ticari faaliyetler ile birlikte ülkelerin koydukları yaptırımlar göz önüne alındığında hava kirliliğinin azaltılması için benzinli veya dizel araçlar yerine elektrikli araçların kullanımı şart olmuştur. Bunun sonucunda tüm dünyada elektrikli araçların satışında artışlar olmuştur.

Elektrikli araçların kullanımıyla atmosfere salınan sera gazlarının miktarı ile orantılı olarak kirletici yükü ve karbon ayak izi de azalacaktır. Küresel ölçekte önemli bir yere sahip olan elektrikli araçların seçimi tüketiciler için ise zorlu bir karar verme sürecidir. Bu çalışmada da, yeşil lojistik faaliyetleri kapsamında elektrikli kamyon seçiminde dikkat edilecek kriterlerin belirlenmesi ve piyasada mevcut olan alternatiflerin bu kriterlere göre değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Belirsizlik ve subjektifliği en aza indirgeyebilmek amacıyla dairesel sezgisel bulanık setlerden yararlanılacaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde konu hakkında literatür taraması yapılacak, üçüncü bölümde ise dairesel sezgisel bulanık setlere dayanan VIKOR yöntemi tanıtılacaktır. Dördüncü bölümde elektrikli kamyon seçimi uygulaması yapılacaktır. Beşinci bölümde elde edilen bulgular ile birlikte duyarlılık analizi yapılacaktır. Son bölümde ise çalışmada elde edilen sonuçlar verilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

1 Mayıs 2024 tarihinde Web of Science veri tabanında konu aramasında “electric vehicle” anahtar kelimesi kullanılarak yapılan arama sonucunda 42.755 adet sonuç bulunmuştur. Bu sonuçlardan 24.355 tanesi makale, 17.585 tanesi bildiri, 1.396 tanesi derleme makale ve 138 tanesi kitap bölümü gibi farklı türlerde yayınlanmıştır. 2000-2024 yılları arasında elektrikli araçlar hakkında yapılan araştırmaların yıllara göre sayıları Şekil 2’de verilmiştir.



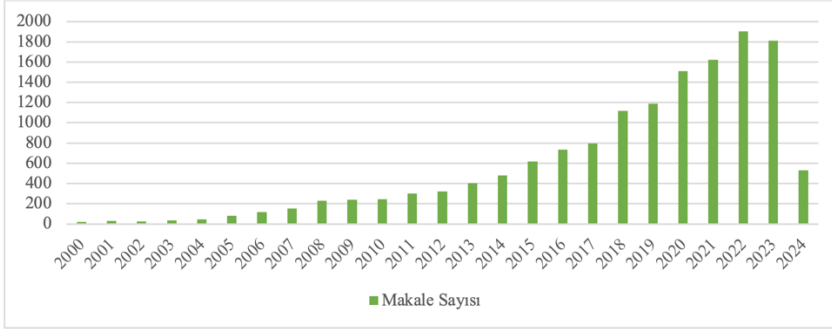
Şekil 2. Elektrikli Araç için Yıllara Göre Makale Sayısı (Web of Science, 2024a)

Şekil 2’den de görüleceği üzere elektrikli araçlar üzerine yapılan çalışmaların sayısı yıllar geçtikçe artmaktadır. Pasha ve arkadaşları 2024 yılında yaptıkları çalışmada, sınırlı sürüş menzili, yakıt ve taşıma kapasite kısıtları altında en iyi elektrikli araç dağıtım planlamasının yapıldığı çalışmaları incelemişlerdir. Toplanan çalışmalar ayrıntılı bir inceleme için üç kategoride gruplandırılmıştır: genel elektrikli araç planlama, elektrik şebekesi dikkate alınarak elektrikli araç planlama ve çevresel hususlar dikkate alınarak elektrikli araç planlama. Her çalışma grubu için detaylı raporlar sunulmuştur (Pasha ve ark., 2024). Farinloye ve arkadaşları ise yaptıkları çalışmada Nijerya’da Elektrikli araçların benimsenmesine ilişkin önemli araştırma boşluklarını ele almışlardır. Çalışma kapsamında, sürdürülebilir ulaşım çözümleri için teorik ve pratik çıkarımlar sunulmakta, gelişmekte olan ülkelerde elektrikli araçların benimsenmesine değerli bilgiler sağlanmaktadır (Farinloye ve ark., 2024). Bhavsar ve çalışma arkadaşları iki tekerlekli elektrikli araçların gerçek çalışma koşulları altındaki performanslarını ölçmüşlerdir. İnvertörden gelen ve çıkan gerçek zamanlı akım ve gerilim, motorun çalışma frekansı, güç faktörü, katedilen mesafe ve hız gibi parametrelere ait verileri toplamışlardır. Toplam sürüş süresinin %80’inin üzerinde invertörün verimliliğinin %95’in üzerinde olduğu, toplam sürüş süresinin %50’sinde ise motorun güç faktörünün 0,8’in üzerinde olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Bhavsar ve ark., 2024). Deng ve arkadaşları geliştirdikleri ve adına IDE (Improved Differential Evolution) dedikleri algoritmaları ile elektrikli araç rotalama problemini ele alarak gerçek hayat problemlerinde kirlilik yükünü azaltıcı yeşil lojistik faaliyetleri destelemeyi amaçlamışlardır (Deng ve ark., 2024). Benzer şekilde literatürde kirlenici yükünü azaltarak taşıma maliyetleri ve teslimat sürelerini en aza indirmek üzere geliştirilmiş sezgisel algoritmalar bulunmaktadır (Wang ve ark., 2024; Kim, 2024).

Özellikle son 20 yıldır hayatımızda yer alan sürdürülebilir ve yeşil lojistik kavramları pek çok araştırmacının odak noktası haline gelmiştir. Bu noktada elektrikli araçlar için de çok farklı bakış açıları ile farklı problemler ele alınarak çözümler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu problemlerden bir tanesi de karar vermedir. En uygun alternatifin belirlenmesi ya da seçilmesi gibi problemler tipik çok kriterli karar verme (ÇKKV)

problemleri grubuna girmektedir. Mevcut alternatifler belirlenen kriterler ışığı altında önerilen uygun ÇKKV yöntemleri kullanılarak değerlendirilirler.

2 Mayıs 2024 tarihinde Web of Science veri tabanında konu aramasında “multi-criteria decision making” anahtar kelimesi kullanılarak yapılan arama sonucunda 14634 adet sonuç bulunmuştur. Bu sonuçlardan 11.798 tanesi makale, 2.616 tanesi bildiri, 354 tanesi derleme makale ve 124 tanesi kitap bölümü gibi farklı türlerde yayınlanmıştır. 2000-2024 yılları arasında ÇKKV hakkında yapılan araştırmaların yıllara göre sayıları Şekil 3’de verilmiştir.



Şekil 3. Çok Kriterli Karar Verme için Yıllara Göre Makale Sayısı (Web of Science, 2024b)

ÇKKV problemleri çok farklı araştırmacılar tarafından çok farklı sektörler için çalışılmış ve bu problemlere ait çalışmalar Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Çok Kriterli Karar Verme Araştırmalarının Özeti

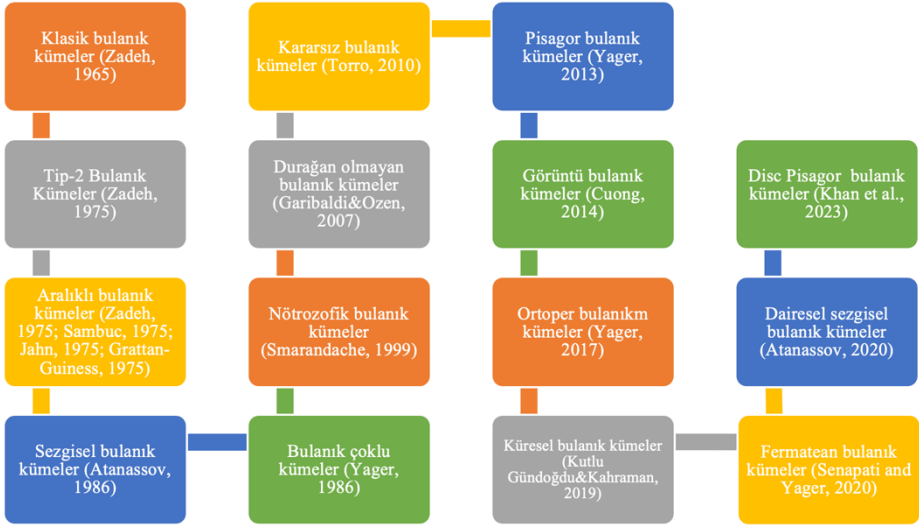
| Yazar(lar) | Araştırmanın Amacı | Kullanılan Yöntem |
|---------------------------|---|----------------------------------|
| Pouresmaeil ve ark., 2022 | ÇKKV problemlerini çözmek üzere yeni bir algoritma önerilmesi | Aralık nütrozofik tabanlı TOPSIS |
| Al Hazza ve ark., 2023 | Tedarikçi seçimi ve değerlendirilmesi | SOCCER ve AHP |
| Manik, 2023 | Tedarikçi seçim problemi | AHP |
| Albayrak & Turanlı, 2022 | Hidroelektrik santral seçimi | TOPSIS |
| Güleç ve Ayvaz, 2021 | İtfaiye istasyonlarındaki tehlikelerin değerlendirilmesi | AHP-TOPSIS |
| Opricovic, 2011 | Su kaynaklarının planlaması | Bulanık VIKOR |
| Meniz & Özkan, 2023 | COVID-19 pandemi döneminde ideal aşının değerlendirilmesi | VIKOR |
| Hassan ve ark., 2023 | İnşaat sektöründe döngüsel ekonomik faaliyetlerin değerlendirilmesi | Bulanık SWARA ve VIKOR |
| Ada ve ark., 2023 | Elektronik atıklar için akıllı teknolojilerin değerlendirilmesi | Bulanık ANP ve VIKOR |

| | | |
|------------------------|--|--|
| Ourya & Abderafi, 2023 | Temiz ve yenilenebilir hidrojen üretim süreci değerlendirmesi | Bulanık AHP ve VIKOR |
| Singh ve ark., 2023 | Yazılım süreçlerinin değerlendirilmesi | Bulanık AHP ve TOPSIS |
| Huang ve ark., 2023 | Alüminyum endüstrisinde çalışma koşullarının değerlendirilmesi | CRITIC ve TOPSIS |
| Kaur ve ark., 2023 | Güneş enerjisi panel seçimi | Entropy-TOPSIS |
| Rani ve ark., 2020 | Güneş paneli seçimi | Pisagor bulanık sayılara dayalı SWARA ve VIKOR |
| Arslan, 2018 | Araç seçimi problemi | AHP-VIKOR |

Yük taşımacılığında elektrikli araçların değerlendirilmesinde ÇKKV yöntemlerinin kullanılmasına ilişkin araştırmalara rastlanmaktadır. Jaller ve Otay (2020) yük taşımacılığında kullanılabilir sürdürülebilir araçların küresel bulanık setlere dayanan AHP-TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmesine yönelik alternatifleri finans, iş ve pazar, çevresel ve yasal, bakım ve onarım, güvenlik ve araç performansları gibi farklı kriterler açısından değerlendirmişlerdir. Wałtróbski ve arkadaşları da PROMETHEE II ve bulanık TOPSIS yöntemlerini kullanarak elektrikli yük taşıtlarının değerlendirilmesi için bir çalışma yapmışlardır (Wałtróbski ve ark., 2017). Artan küresel çevre bilinci ve hava kirliliğinin önlenmesi adına ulaşım ve nakliye için geleneksel araçların yerine sürdürülebilir ve çevre dostu araçların kullanılması ve değerlendirilmesi için araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir (Kijewska ve ark., 2019; Das ve ark., 2019; Kijewska ve ark., 2019; Wang ve ark., 2023; Aiello ve ark., 2024; Bošković ve ark., 2023; Tian ve ark., 2023; Pathak ve ark., 2021).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çok kriterli karar verme problemleriyle günlük hayatın her alanında karşılaşmaktadır. Bu sorunları çözmek için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), VİseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR), İdeal Çözümlere Benzerliğe Göre Sıralama Tercihi Tekniği (TOPSIS), Analitik Ağ Süreci (ANP) ve Karmaşık Orantılı Değerlendirme (COPRAS) gibi birçok yöntem kullanılmaktadır. Probleme ait çevre koşulları ve elde edilen bilgiler hakkında belirsizlik olması durumunda sezgisel bulanık kümeler kullanılır. Klasik küme veya mantık teorisinde bir elemanın bir kümeye ait olması 0 ve 1 sayıları kullanılarak keskin bir şekilde derecelendirilir. Yani eleman ya o kümeye dahildir (durum 1) ya da dahil değildir (durum 0) (Zimmermann, 2001). Bulanık mantık, zor ve karmaşık problemlerin çözümünde kolay ve kullanışlı çözümler bulma yaklaşımı sayesinde geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Genel olarak tıp, sosyoloji, mühendislik, psikoloji, yapay zekâ, akıllı sistemler, robotik, sinyal işleme, kavşak, ulaşım problemleri gibi birçok alanın konusu olmuştur. Bulanık kümeler Zadeh (1965) tarafından geliştirilmiş ve daha sonra birçok araştırmacı bulanık kümeler üzerinde araştırmalar yapmış ve literatürde sıradan bulanık kümelerin uzantıları tanımlanmıştır. Bulanık kümelerin ortaya çıkışının kronolojik sırası Şekil 4'te verilmiştir.

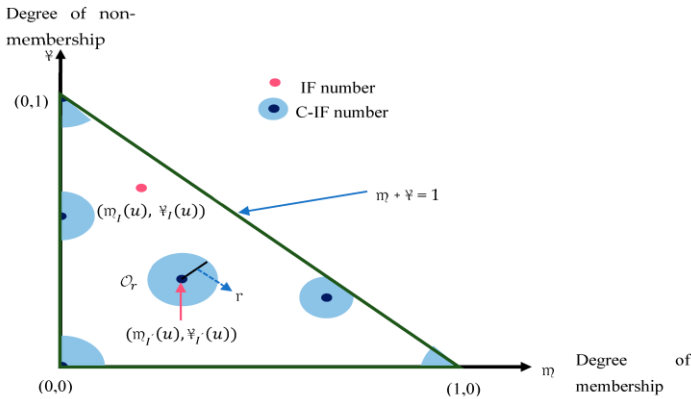


Şekil 4. Bulanık Kümelerin Tarihsel Gelişimi

Dairesel sezgisel bulanık kümeler, sezgisel bulanık kümelerin uzantılarıdır. Atanassov tarafından 2020 yılında geliştirilen, üyelik fonksiyonunun üçüncü boyutlu belirsizliğinin bir daire ile temsil edildiği bu bulanık kümelerde, karar vericiler bu belirsizliği içeren yargıları da dikkate almaktadır (Atanassov, 2020; Khan ve ark., 2022; Chen, 2023; Kahraman & Alkan, 2021).

3.1. Dairesel Sezgisel Bulanık Kümelere Dayanan VIKOR Yöntemi

Bu bölümde çalışmada kullanılacak olan ÇKKV yönteminin işlem adımları verilecektir. Sezgisel bulanık (IF) ve dairesel sezgisel (C-IF) bulanık bir sayının geometrik gösterimi Şekil 5'te verildiği gibidir.



Şekil 5. Sezgisel Bulanık ve Dairesel Sezgisel Bulanık Sayıların Geometrik Gösterimi

Dairesel sezgisel bulanık kümelere dayanan VIKOR yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir (Chen, 2023):

Adım 1. Alternatiflere ait başlangıç karar matrisi, Tablo 2’de verilen dilsel değişkenlere karşılık gelen sezgisel bulanık sayılar kullanılarak oluşturulur.

Tablo 2. Alternatiflerin Kriterlere Göre Değerlendirme Ölçeği

| Dilsel İfadeler | Sezgisel Bulanık Sayılar | |
|------------------------------|--------------------------|----------|
| | \leq | \nless |
| Çok çok yüksek değerli (EHV) | 0,90 | 0,10 |
| Çok yüksek değerli (VHV) | 0,80 | 0,15 |
| Yüksek değerli (HV) | 0,70 | 0,25 |
| Ortalama üstü değerli (AAV) | 0,60 | 0,35 |
| Ortalama değerli (AV) | 0,50 | 0,45 |
| Ortalama altı değerli (BAV) | 0,40 | 0,55 |
| Düşük değerli (LV) | 030 | 0,65 |
| Çok düşük değerli (VLV) | 0,20 | 0,75 |
| Çok çok düşük değerli (ELV) | 0,10 | 0,90 |

Adım 2. Değerlendirme birden fazla kişi tarafından yapıldıysa her bir karar verici tarafından yapılan değerlendirme sonuçları aşağıdaki denklem kullanılarak tek bir değere dönüştürülür.

$$\langle m_{ij}, \nless_{ij} \rangle = \left\langle \frac{\sum_{k=1}^l w_k * m_{ij}^k}{l}, \frac{\sum_{k=1}^l w_k * \nless_{ij}^k}{l} \right\rangle \quad (1)$$

Burada m_{ij} üyelik derecesini, \nless_{ij} üyelik olmama derecesini, w_k değerlendirmeyi yapan karar verici bireylerin tecrübe, deneyim ve bilgi birikimlerine göre aldıkları ağırlık değerini ve l ise karar verici birey sayısını ifade etmektedir.

Adım 3. Her bir sezgisel bulanık sayıya ait yarıçap değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$r_{ij} = \max_{k=1,2,\dots,l} \sqrt{\left(m_{ij} - m_{ij}^k \right)^2 + \left(\nless_{ij} - \nless_{ij}^k \right)^2} \quad (2)$$

Burada r_{ij} sezgisel bulanık sayıya ait yarıçap değerini ifade etmektedir.

Adım 4. Yarıçap değerleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki gibi dairesel sezgisel bulanık küme matrisi oluşturulur.

$$M = \langle X_{ij} \rangle = \langle (m_{ij}, \forall_{ij}; r_{ij}) \rangle \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \tag{3}$$

Burada m alternatif sayısını ifade ederken, n kriter sayısını göstermektedir.

Adım 5. ÇKKV problemlerinin çözümünde kriter ağırlıklarının belirlenmesi önemli adımlardan biridir. Gerçek hayat problemlerinde kriter ağırlıklarının her birinin birbirine eşit olması durumu gerçeği çok yansıtmamakla birlikte bazı durumlarda kullanılabilir. Aksi durumda Tablo 3'te verilen dilsel ölçek kullanılarak kriterler değerlendirilir. Ağırlık vektörü, Denklem 4'te verildiği gibi Ki-Kare mesafeye dayalı sapma ölçüsü kullanılarak hesaplanır.

Tablo 3. Kriterlere Ait Değerlendirme Ölçeği

| Dilsel İfadeler | Sezgisel Bulanık Sayılar | |
|-----------------------------|--------------------------|------|
| | ≤ | ¥ |
| Çok çok yüksek önemli (EHI) | 0,90 | 0,10 |
| Çok yüksek önemli (VHI) | 0,80 | 0,15 |
| Yüksek önemli (HI) | 0,70 | 0,25 |
| Orta üstü önemli (AAI) | 0,60 | 0,35 |
| Orta önemli (AI) | 0,50 | 0,45 |
| Orta altı önemli (BAI) | 0,40 | 0,55 |
| Düşük önemli (LI) | 0,30 | 0,65 |
| Çok düşük önemli (VLI) | 0,20 | 0,75 |
| Çok çok düşük önemli (ELI) | 0,10 | 0,90 |

$$P_1 = \left\{ \left(u_i, \leq_{P_1}(u_i), \forall_{P_1}(u_i); r_{P_1}(u_i) \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\}$$

ve

$$00P_2 = \left\{ \left(u_i, \leq_{P_2}(u_i), \forall_{P_2}(u_i); r_{P_2}(u_i) \right) \mid i = 1, 2, \dots, n \right\}$$

gibi iki farklı dairesel sezgisel bulanık sayı tanımlansın. Bu iki sayı arasındaki mesafe Ki-Kare mesafeye dayalı sapma ölçüsüne göre Denklem 4 kullanılarak hesaplanır.

$$\bar{D}(P_1, P_2) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{(\leq_{P_1}(u_i) - \leq_{P_2}(u_i))^2}{1 + \leq_{P_1}(u_i) + \leq_{P_2}(u_i)} + \frac{(\forall_{P_1}(u_i) - \forall_{P_2}(u_i))^2}{1 + \forall_{P_1}(u_i) + \forall_{P_2}(u_i)} + \frac{(r_{P_1}(u_i) - r_{P_2}(u_i))^2}{1 + r_{P_1}(u_i) + r_{P_2}(u_i)} \right] \tag{4}$$

Mesafe ölçüleri belirlendikten sonra Denklem 5 kullanılarak kriterlere ait ağırlıklar hesaplanır.

$$w_j = \frac{\frac{1}{m-1} (\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \bar{D}_k(X_{ij}, X_{kj}))}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{1}{m-1} (\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \bar{D}_k(X_{ij}, X_{kj})) \right]} \quad j = 1, 2, \dots, n. \tag{5}$$

Adım 6. Her kriter için pozitif ideal (PI) ve negatif ideal (NI) dairesel sezgisel bulanık değerler (C-IFV) vardır. Bu değerler en iyi alternatife ulaşmaya ve en kötü alternatiften uzaklaşmaya yardımcı olur. Bu değerler aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$PI_j = \left\{ \left(\max_{i=1, \dots, m} (\leq_{ij}), \min_{i=1, \dots, m} (\forall_{ij}); \max_{i=1, \dots, m} (r_{ij}) \right) \right\} \quad (6)$$

$$NI_j = \left\{ \left(\min_{i=1, \dots, m} (\leq_{ij}), \max_{i=1, \dots, m} (\forall_{ij}); \min_{i=1, \dots, m} (r_{ij}) \right) \right\} \quad (7)$$

Adım 7. Yukarıda verilen sapma ölçüsü, her bir C-IFV'ler, PI-C-IFV'ler ve PI-NI C-IFV'ler arasındaki sapmayı hesaplamak için kullanılır.

Adım 8. Her alternatif için grup fayda endeksi (\bar{S}), bireysel pişmanlık endeksi (\bar{R}) ve uzlaşma endeksi (\bar{Q}) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\bar{S}(u_i) = \sum_{j=1}^n w_j * \frac{\bar{D}_k(PI_j, X_{ij})}{\bar{D}_k(PI_j, NI_j)} \quad (8)$$

$$\bar{R}(u_i) = \max_{j=1, \dots, n} w_j * \frac{\bar{D}_k(PI_j, X_{ij})}{\bar{D}_k(PI_j, NI_j)} \quad (9)$$

$$\bar{Q}(u_i) = \frac{v * \bar{S}(u_i) - \min_{i=1, \dots, m} \bar{S}(u_i)}{\max_{i=1, \dots, m} \bar{S}(u_i) - \min_{i=1, \dots, m} \bar{S}(u_i)} + \frac{(1-v) * \bar{R}(u_i) - \min_{i=1, \dots, m} \bar{R}(u_i)}{\max_{i=1, \dots, m} \bar{R}(u_i) - \min_{i=1, \dots, m} \bar{R}(u_i)} \quad (10)$$

burada X_{ij} , i . alternatifin j . kritere göre dairesel sezgisel bulanık sayısıdır ve v maksimum grup faydasını ifade etmektedir. v 0 ile 1 arasında değişiklik gösterirken genellikle 0,5 olarak Kabul edilmektedir.

Adım 9. \bar{S} , \bar{R} , and \bar{Q} değerleri küçükten büyüğe doğru sıralanır. Aşağıda verilen iki koşulun sağlanması durumunda; alternatifler \bar{Q} değerlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralandığında ilk sırada yer alan alternatif uzlaşık çözüm olarak kabul edilir.

Koşul I. Kabul edilebilir avantaj koşulu: Aşağıdaki koşul sağlanmalıdır. Burada X'' ikinci sırada yer alan alternatif, X' ise ilk sırada yer alan alternatiftir. m ise alternatif sayısıdır.

$$X'' - X' \geq \frac{1}{m-1} \quad (11)$$

Koşul II. Karar alma sürecinde kabul edilebilir istikrar koşulu: Alternatif X' , \bar{S} veya/ve \bar{R} ile yapılan sıralamada en az birinden en iyi skoru elde etmiş olmalıdır. Bu uzlaşık çözüm bir karar verme süreci içinde istikrarlıdır.

Yukarıda tanımlanan koşullardan birinin sağlanamaması durumunda uzlaşık çözüm setleri aşağıdaki gibi önerilir:

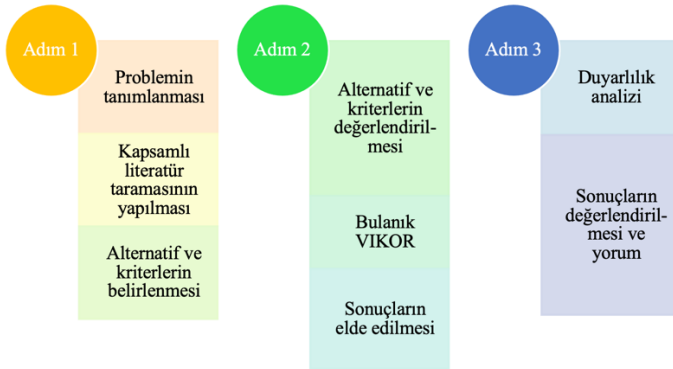
- Yalnızca ikinci koşul sağlanamıyorsa alternatifler X' ve X'' birlikte uzlaşık çözüm olarak kabul edilir.
- Eğer birinci koşul sağlanamıyorsa alternatifler X' , X'' , ..., X_m olmak üzere ve X_m , maksimum m için aşağıdaki bağıntıdan tanımlanır.

$$X^m - X' < \frac{1}{m-1} \quad (12)$$

Bu koşul sağlanıyorsa \bar{Q} değerine göre sıralama yapılır ve en düşük \bar{Q} değerine sahip olan alternatif en iyi olan seçenektir.

4. ELEKTRİKLİ KAMYON SEÇİM PROBLEMİ

Bu bölümde yeşil lojistik faaliyetleri kapsamında piyasada satışı olan kamyonların belirlenen seçim kriterlerine göre değerlendirmesi ele alınacaktır. Değerlendirme için dairesel sezgisel bulanık sayılara dayanan VIKOR yöntemi kullanılacaktır. VIKOR özellikle dikkate alınması gereken birden fazla kriterin olduğu ve bu kriterlerin birbirleriyle çatışabileceği durumlarda faydalıdır. Karar vericilerin çeşitli hedefleri dengeleyen uzlaşmacı bir çözüm bulmasına yardımcı olan karar verme sürecine sistematik bir yaklaşım sağlar. Ayrıca mevcut problemdeki belirsizlik ve subjektifliği de en aza indirgeyebilmek için VIKOR yönteminin temeli dairesel sezgisel bulanık sayılara dayandırılmıştır. VIKOR yöntemi hem basit işlem adımları hem de literatürde sıklıkla kullanılması sebebiyle tercih edilmiştir. VIKOR, karar vericilere farklı alternatifler arasında bir denge sağlayarak en iyi karma çözümü veren bir yöntemdir. Çok sayıda kritere göre alternatiflerin değerlendirilerek uzlaşık bir çözüm elde edilir. Ayrıca VIKOR yönteminde en kötü durum dikkate alınarak her bir alternatifin en kötü performans gösterdiği kriterler üzerinden değerlendirme yapılır. Bu da kritik kriterler de performansın iyileştirilmesine olanak sağlar. Kriterlerin önem dereceleri göz önünde bulundurularak alternatifler değerlendirilir. Bu yöntemin uygulanmasında daha az sayıda bilgiye ihtiyaç duyulduğundan sıklıkla kullanılır. Çeşitli ağırlıklandırma ve performans ölçütleri ile kolaylıkla uyum sağlayabilen bir yöntemdir. Çalışmanın akış şeması Şekil 6'da verildiği gibidir.



Şekil 6. Akış Şeması

4.1. Kriterlerin ve Alternatiflerin Belirlenmesi

Literatürde yapılan incelemeler sonucunda elektrikli araçlar için önemli olan kriterlerin Tablo 4'te verildiği gibi olduğu belirlenmiştir. Tüm kamyonlara ait ortalama fiyatlar benzerlik gösterdiğinden değerlendirme kriteri olarak dikkate alınmamıştır.

Tablo 4. Kriterler, Kodları ve Tanımları

| Kriter Adı | Kriter Kodu | Tanım |
|--|----------------|--|
| Batarya kapasitesi (Rong & Pedram, 2003; Voelekar, 2021) | C ₁ | Kullanılan bataryanın büyüklüğü aracın menzilini etkileyeceğinden önemli bir kriterdir. |
| Şarj süresi (Kerem, 2014; Cogen, 2010) | C ₂ | Zaman açısından bataryanın en kısa sürede dolması beklenmektedir. |
| Motor gücü (Sejwal ve ark., 2022) | C ₃ | Bir elektrik motorunun gücü, onun iş yapma kabiliyetini gösteren çok önemli bir özelliktir. Elektrikli araçlar, endüstriyel makineler veya ev aletleri gibi çeşitli uygulamalarda motorun güç değeri, hız, tork ve verimlilik gibi performans özelliklerini belirler. |
| Tork (Sonar & Kulkarni, 2021) | C ₄ | Tork, dönme hareketi oluşturmak için gereklidir. Daha yüksek tork değerleri, daha yüksek dönme kuvvetine işaret eder. |
| Toplam katar ağırlığı | C ₅ | Nakliye ve lojistikte, özellikle de çekme veya taşıma görevlerinde yer alan araçlar için önemli bir ölçümdür. Araçların güvenli ağırlık sınırları dahilinde çalışmasının ve yol güvenliği ve araç yük kapasitelerine ilişkin düzenlemelere uymasının sağlanmasına yardımcı olur. |
| Ortalama hız (Çaloğlu Büyükselçuk & Tozan, 2022) | C ₆ | Aracın ortalama hızını ifade eder. |
| Menzil (Sanguesa ve ark., 2021) | C ₇ | Aracın dolu batarya ile normal koşullar altında katedeceği mesafeyi ifade eder. |
| Enerji Tüketimi (Sonar & Kulkarni, 2021) | C ₈ | 100 km mesafe için aracın ne kadar enerji tükettiğinin göstergesidir. |

Tablo 5. Alternatiflere Ait Bilgiler

| Alternatif Kodu | Açıklama |
|-----------------|---|
| A ₁ | A ₁ alternatifi, 1927 yılından beri otomotiv sektörü başta olmak üzere çeşitli alanlarda hizmet veren şirket İsviçre menşeli şirketin elektrikli kamyonudur. |
| A ₂ | A ₂ alternatifi, 1900'lü yıllardan beri tüm dünyada otomotiv sektöründe önemli bir yere sahip olan Alman menşeli firmanın elektrikli kamyonudur. |
| A ₃ | A ₃ alternatifi, 2003 yılında enerji ve otomotiv sektöründe faaliyet gösteren Amerika Birleşik Devletleri menşeli firmanın elektrikli kamyonudur. |
| A ₄ | A ₄ alternatifi, 1758 yılında Almanya'da kurulan firmanın elektrikli kamyonudur. |

Çalışmada beş kişiden oluşan ve elektrikli araç konusunda tecrübe sahibi olan uzmanlardan yüz yüze veya telefon ile yapılan görüşmeler sonucunda kriterleri Tablo 3'de verilen değerlendirme ölçeğine göre değerlendirmeleri istenmiş ve Tablo 6'daki sonuçlar elde edilmiştir. Karar verici takım, elektrikli araç konusunda akademik makaleleri olan iki akademisyen ve elektrikli kamyon ve araç satışında profesyonel olarak çalışan üç satış temsilcisinden oluşmaktadır. Her bir elektrikli kamyonun ait teknik özellikler ilgili firmaların resmî web sayfalarından temin edilmiştir. Alternatiflerinde bu teknik verilere göre Tablo 2'deki dilsel değerlendirmelere göre değerlendirmesi yapılmış ve sonuçlar Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. Kriterler için Karar Verici Takım Tarafından Yapılan Değerlendirme Sonuçları

| Karar Verici | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| C ₁ | HI | HI | HI | HI | BAI |
| C ₂ | VHI | EHI | EHI | VHI | VHI |
| C ₃ | HI | AI | HI | HI | BAI |
| C ₄ | AAI | BAI | HI | HI | AI |
| C ₅ | HI | VLI | HI | HI | BAI |
| C ₆ | AI | LI | ELI | HI | BAI |
| C ₇ | EHI | EHI | EHI | VHI | VHI |
| C ₈ | EHI | HI | ELI | AAI | AAI |

Tablo 7. Alternatiflere Ait Başlangıç Karar Matrisi

| Karar Verici | Alternatifler | Kriterler | | | | | | | |
|-----------------|----------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 |
| DM ₁ | A ₁ | AAV | AV | AAV | AV | EHV | BAV | LV | HV |
| | A ₂ | HV | EHV | BAV | LV | AV | AV | HV | AV |
| | A ₃ | EHV | HV | EHV | EHV | HV | HV | EHV | HV |
| | A ₄ | AV | HV | AAV | BAV | AV | VLV | AV | AV |
| DM ₂ | A ₁ | AV | AAV | AV | AAV | HV | AV | VLV | VHV |
| | A ₂ | VHV | EHV | AV | LV | AV | AAV | HV | BAV |
| | A ₃ | EHV | HV | HV | VHV | HV | VHV | EHV | EHV |
| | A ₄ | BAV | AAV | AV | BAV | BAV | LV | AAV | AAV |
| DM ₃ | A ₁ | AAV | BAV | AAV | AV | EHV | BAV | VLV | HV |
| | A ₂ | HV | VHV | BAV | BAV | AAV | AAV | VHV | AAV |
| | A ₃ | EHV | BAV | EHV | HV | HV | HV | EHV | VHV |
| | A ₄ | AAV | AAV | AV | AV | BAV | VLV | BAV | AAV |
| DM ₄ | A ₁ | AAV | BAV | AV | AAV | EHV | BAV | LV | HV |
| | A ₂ | HV | HV | BAV | LV | BAV | BAV | VHV | AV |
| | A ₃ | HV | HV | EHV | VHV | VHV | HV | EHV | HV |
| | A ₄ | AV | AAV | AV | AV | AV | LV | AAV | AV |
| DM ₅ | A ₁ | AAV | AV | AAV | AV | HV | BAV | LV | VHV |
| | A ₂ | HV | HV | BAV | VLV | BAV | AV | HV | AAV |
| | A ₃ | EHV | HV | HV | EHV | HV | HV | VHV | HV |
| | A ₄ | AV | HV | AV | BAV | BAV | LV | AV | AAV |

4.2. Birleştirilmiş Karar Matrisi ve Kriter Ağırlıkları

Denklem (1) kullanılarak beş karar vericinin yaptığı değerlendirmeler tek bir matrise indirgenmiştir. Bu birleştirilmiş bulanık sayıların yarıçap değerleri Denklem (2) kullanılarak elde edilmiştir. Kriter ve alternatiflerin sonuçları Tablo 8 ve 9'daki gibidir. Beş karar vericinin her birinin konu hakkındaki bilgi ve deneyimi eşit kabul edilmiştir.

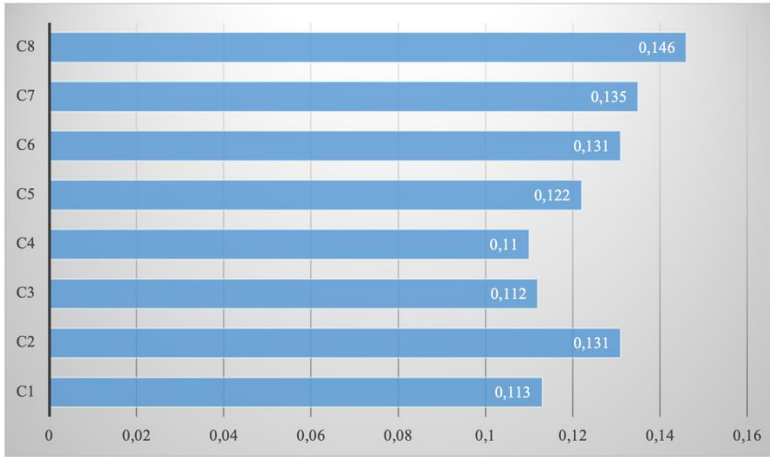
Tablo 8. Kriterlere Ait Birleştirilmiş Matris ve Maksimum Yarıçap Değerleri

| Kriter | η | ζ | Maksimum Yarıçap (r) |
|----------------|--------|---------|----------------------|
| C ₁ | 0,128 | 0,062 | 0,6021 |
| C ₂ | 0,168 | 0,026 | 0,7357 |
| C ₃ | 0,120 | 0,070 | 0,6073 |
| C ₄ | 0,116 | 0,074 | 0,6099 |
| C ₅ | 0,108 | 0,082 | 0,6743 |
| C ₆ | 0,080 | 0,112 | 0,7883 |
| C ₇ | 0,172 | 0,024 | 0,7320 |
| C ₈ | 0,116 | 0,078 | 0,8222 |

Tablo 9. Birleştirilmiş Başlangıç Karar Matrisi

| | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ | C ₇ | C ₈ |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| A ₁ | (0,116, 0,074; 0,557) | (0,074, 0,096; 0,565) | (0,096, 0,094; 0,559) | (0,094, 0,112; 0,56) | (0,112, 0,078; 0,739) | (0,078, 0,108; 0,545) | (0,108, 0,082; 0,63) | (0,082, 0,164; 0,661) |
| A ₂ | (0,144, 0,046; 0,664) | (0,046, 0,16; 0,743) | (0,16, 0,034; 0,545) | (0,034, 0,084; 0,636) | (0,084, 0,106; 0,565) | (0,106, 0,06; 0,562) | (0,06, 0,13; 0,661) | (0,13, 0,096; 0,562) |
| A ₃ | (0,172, 0,026; 0,732) | (0,026, 0,128; 0,602) | (0,128, 0,062; 0,739) | (0,062, 0,164; 0,739) | (0,164, 0,032; 0,664) | (0,032, 0,164; 0,664) | (0,164, 0,03; 0,728) | (0,03, 0,144; 0,75) |
| A ₄ | (0,1, 0,09; 0,564) | (0,09, 0,128; 0,602) | (0,128, 0,062; 0,562) | (0,062, 0,104; 0,546) | (0,104, 0,086; 0,546) | (0,086, 0,088; 0,63) | (0,088, 0,102; 0,562) | (0,102, 0,088; 0,559) |

Denklem (4) kullanılarak Ki-Kare mesafe sapma ölçüleri hesaplandıktan sonra Denklem (5) kullanılarak kriter ağırlıkları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Kriter Ağırlıkları

Şekil 7’den de anlaşılacağı üzere en önemli kriterin enerji tüketimi olduğu (%14,6) sonucuna varılır. Onu takip eden kriterler ise menzil (%13,5), şarj süresi (%13,1) ve ortalama hız (%13,1) olarak bulunmuştur.

4.3. Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Piyasada satışları söz konusu olan dört farklı elektrikli kamyonu değerlendirmek için, pozitif ideal ve negatif ideal dairesel sezgisel bulanık değerler Denklem (7) ve (7) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerlerden, her bir kriter için en uygun ve en az tercih edilen alternatiflerin belirlenmesinde yararlanılmıştır (Tablo 10). Ki-Kare mesafe

ölçüm sapmaları Denklem (4) kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10. Pozitif İdeal ve Negatif İdeal Dairesel Sezgisel Bulanık Sayılar

| Kriter | PI_j | NI_j |
|----------------|-----------------------|-----------------------|
| C ₁ | (0,172, 0,026; 0,732) | (0,100, 0,090; 0,557) |
| C ₂ | (0,160, 0,034; 0,743) | (0,096, 0,094; 0,565) |
| C ₃ | (0,164, 0,032; 0,739) | (0,084, 0,106; 0,545) |
| C ₄ | (0,164, 0,030; 0,739) | (0,060, 0,130; 0,546) |
| C ₅ | (0,164, 0,032; 0,739) | (0,088, 0,102; 0,546) |
| C ₆ | (0,144, 0,046; 0,664) | (0,052, 0,138; 0,545) |
| C ₇ | (0,176, 0,022; 0,728) | (0,052, 0,138; 0,562) |
| C ₈ | (0,152, 0,040; 0,750) | (0,104, 0,086; 0,559) |

Tablo 11. C-IFVs-PI_j and PI_j-NI_j ler Kullanılarak Mesafe Ölçüm Sapmaları

| $D = CIFVs, PI_j$ | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ | C ₇ | C ₈ |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| A ₁ | 0,0178 | 0,0207 | 0,0183 | 0,0189 | 0,0001 | 0,0271 | 0,0270 | 0,0028 |
| A ₂ | 0,0029 | 0,0000 | 0,0263 | 0,0210 | 0,0201 | 0,0191 | 0,0030 | 0,0191 |
| A ₃ | 0,0001 | 0,0098 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0028 | 0,0028 | 0,0003 | 0,0002 |
| A ₄ | 0,0199 | 0,0100 | 0,0193 | 0,0256 | 0,0256 | 0,0254 | 0,0193 | 0,0184 |
| $D = PI_j, NI_j$ | 0,0211 | 0,0201 | 0,0264 | 0,0338 | 0,0253 | 0,0207 | 0,0362 | 0,0196 |

Denklem (8), (9) ve (10) kullanılarak Q^- , R^- ve S^- değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 12'de verilmiştir.

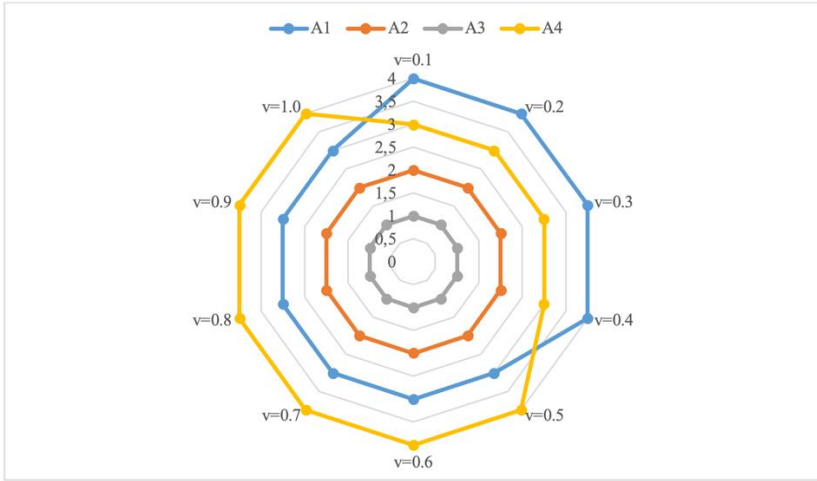
Tablo 12. Q^- , R^- ve S^- Değerlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması

| $v = 0.5$ | A1 | A2 | A3 | A4 | Ranking |
|-----------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|
| \bar{S} | 0,6643 | 0,5666 | 0,0989 | 0,8298 | $A_3 > A_2 > A_1 > A_4$ |
| \bar{R} | 0,1726 | 0,1419 | 0,0643 | 0,1614 | $A_3 > A_2 > A_4 > A_1$ |
| \bar{Q} | 0,8868 | 0,6781 | 0,0000 | 0,9483 | $A_3 > A_2 > A_1 > A_4$ |

Koşul I ve Koşul II de sağlandığından dolayı A₃ alternatifi en iyi elektrikli kamyon olarak belirlenmiştir. İkinci sırada ise A₂ alternatifi yer almaktadır.

4.4. Duyarlılık Analizi

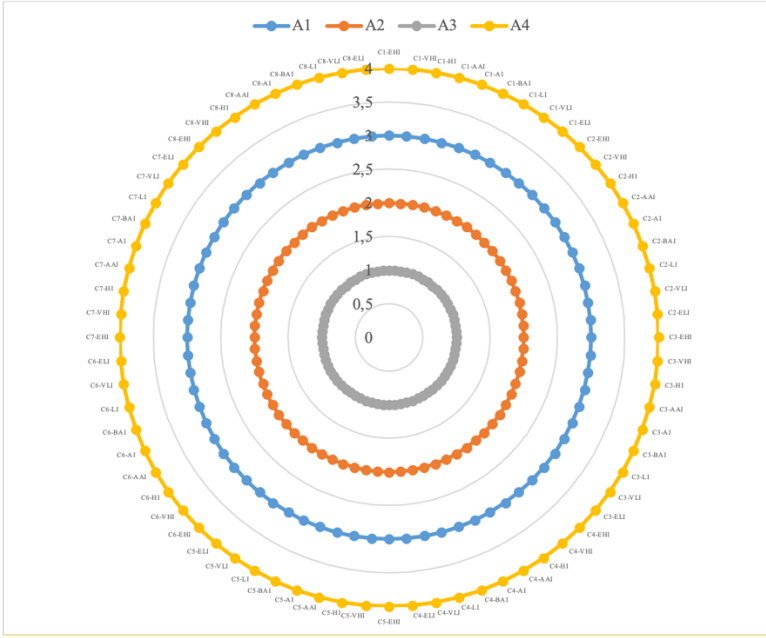
Bu bölümde araştırma probleminin çözümünde alternatiflerin sıralamasının çeşitli koşullar altında nasıl değiştiğini araştırmak için duyarlılık analizi yapılacaktır. Başlangıçta, uzlaşma endeksi değerini hesaplamak için kullanılan grup faydasının maksimum değerleri değiştirilmiş ve bunun sonucunda alternatiflerin sıralamasında meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir. Sonuçlar, maksimum grup fayda değerlerinin 0 ile 1 aralığında onda bir oranında kademeli olarak artırılmasıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve ilgili değişiklikler Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Farklı v Değerleri için Alternatiflerin Sıralanması

Şekil 8 incelendiği zaman tüm v değerleri için (0 ile 1 aralığında) ilk sırada yer alan alternatifin (A3) değişmediği ve ikinci sırada yer alan alternatifin (A2) değişmediği sonucuna varılmıştır. Üçüncü ve dördüncü sırada yer alan alternatiflerin ise kendi aralığında değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir. v değerinin 0, 0,1, 0,2, ve 0,3 olması durumunda üçüncü sırada dördüncü alternatifin (A4) yer aldığı; v değerinin 0,4’e eşit ve büyük olduğu değerler için (1.0’a kadar) dördüncü alternatifin (A4) dördüncü sırada yer aldığı tespit edilmiştir.

Her bir kriterin “çok çok yüksek önemli (EHI)” değerlendirme ölçeğinden “çok çok düşük önemli (ELI)” değerlendirme ölçeğine göre değerlendirmesi sonucunda alternatif sıralamalarında herhangi bir değişiklik olmadığı sonucuna varılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Farklı Kriter Önem Düzeyleri için Alternatiflerin Sıralanması

4.4. Karşılaştırma Analizi

Bu bölümde aynı problemin farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak çözülmesi sonucunda alternatiflerin sıralamalarının nasıl değişeceğine değinilecektir. Problemin klasik bulanık kümelerden üçgensel bulanık sayılara dayanan farklı ÇKKV yöntemleri ile çözümünde Python yazılımı kullanılmıştır. Farklı ÇKKV yöntemleri ile çözüm gerçekleştiğinde alternatiflerin sıralamasında değişiklik olmamıştır. Sadece TOPSIS ile yapılan çözümde A₄ alternatifi en iyi alternatif olarak bulunmuştur (Tablo 13).

Tablo 13. Karşılaştırmalı Analiz

| Yöntem | Alternatiflerin Sıralanması |
|-------------------------------------|--|
| Fuzzy OCRA (Ulutaş, 2019) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |
| Fuzzy TOPSIS (Chen, 2000) | A ₄ >A ₁ >A ₂ >A ₃ |
| Fuzzy EDAS (Zindani ve ark., 2019) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |
| Fuzzy ARAS (Fu ve ark., 2021) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |
| Fuzzy CODAS (Panchal ve ark., 2017) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |
| Fuzzy COPRAS (Narang ve ark., 2021) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |
| Fuzzy MABAC (Bozanic ve ark., 2018) | A ₃ >A ₂ >A ₁ >A ₄ |

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Nüfusun hızlı artışı, teknolojinin gelişmesi ve internetin yaygınlaşması, tüketicilerin alışkanlıklarının değişmesi sonucunda lojistik faaliyetlerde de gelişmeler meydana gelmiştir. Özellikle Birleşik Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri doğrultusunda hükümetler, yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları, küresel, uluslararası ve ulusal şirketler bu noktada faaliyetlerini yeniden organize etmektedirler. Ulaşım faaliyetlerinden kaynaklı çevre kirliliği ve hava kirliliğini önlemek üzere işletmeler tedarik zincirlerini yeniden tasarlamaktadırlar. Yaygınlaşan küresel ticari faaliyetler atmosfere yoğun miktarda sera gazı salınımına neden olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada şirketlerin karşılaştıkları lojistik faaliyetlerinde yeşil faaliyetlerin önemli bir parçası olan ulaşım araçlarının en az kirlenmeye sahip olan araçlar olmasına dikkat edilmektedir. Elektrikli kamyon seçim problemi ele alınarak karar vericilere destek olunması amaçlanmıştır. Bu problem tipik bir ÇKKV problemidir. İlk olarak alternatif ve kriterler belirlenmiş, belirlenen alternatifler bu kriterler çerçevesinde dairesel sezgisel bulanık kümelerle dayanan VIKOR yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Belirsizlik ve sübjektifliğin yoğun olması sebebiyle bulanık kümeler kullanılmıştır.

Yapılan literatür taraması ve uzman görüşmeleri neticesinde sekiz farklı değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Değerlendirme sonuçlarına göre enerji tüketimi en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Kamyonların bir yıl içerisinde katettikleri yol düşünüldüğünde bu kriterin ilk sırada yer alması şaşırtıcı değildir. İkinci sırada menzil kriteri yer almaktadır. Bir dolu batarya ile kamyonun alacağı mesafenin maksimum düzeyde olması tercih edilmektedir. Şarj süresi ve aracın ortalama hızı da önemli kriterler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu kriterlere göre dört farklı alternatif değerlendirildiğinde İsviçre menşeli kamyonun en iyi alternatif olduğu sonucuna varılmıştır. Gerek binek gerekse ticari araçlarda bu marka küresel ölçekte üstün başarılarla imza atmaktadır. İkinci sırada yer alan alternatif ise Almanya'nın en köklü otomobil üretici firmasıdır. Gerek binek gerekse ticari araçlarında küresel ölçekte büyük bir pazar payına sahiptirler.

Çalışma için karşılaşılan en önemli sınırlılık alternatif sayısında yaşanmıştır. Piyasada çok fazla sayıda elektrikli kamyonlara ait veriye ulaşılamadığından, verilerine ulaşılabilen sadece dört alternatif değerlendirmeye alınabilmıştır. Daha geniş bir kriter havuzu ile de çalışılması durumunda sonucun nasıl değişeceği gözlenmelidir. Elektrikli kamyonların kullanımı son yıllarda arttığından dolayı, elektrikli kamyon kullanıcılarının geri dönüşlerine yönelik herhangi bir değerlendirmeye ulaşılamadığından çalışmada daha ziyade kamyonların teknik özellikleri dikkate alınmıştır. Ayrıca çalışmanın uluslararası ölçekte yapılması da daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır.

Gelecekte aynı çalışma farklı ÇKKV yöntemleri ile yeniden değerlendirilebilir. Ayrıca kullanılan dairesel sezgisel bulanık kümeler yerine farklı bulanık kümelerde kullanılarak değerlendirmeler yapılabilir. Daha fazla alternatif ve kriter ilavesi ile problem yeniden çözülebilir. Ele alınan teknik kriterlere ilave olarak elektrikli kamyon sürücülerinin kullanımlarına yönelik deneyimlerin de yeni kriterler olarak probleme ilave edilebilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Ada, E., İlter, H.K., Sağnak, M., & Kazancıoğlu, Y. (2023). Smart technologies for collection and classification of electronic waste. *International Journal of Quality and Reliability Management*. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2022-0259>.
- Aiello, G., Quaranta, S., Inguanta, R., Certa, A., & Venticinque, M. (2024). A multi-criteria decision-making framework for zero emission vehicle fleet renewal considering lifecycle and scenario uncertainty. *Energies*, 17, 1371. <https://doi.org/10.3390/en17061371>.
- Albayrak, S., & Turanlı, M. (2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türkiye’de HES (hidroelektrik santral) seçimi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(41), 68-79. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1113158>.
- Al Hazza, M., Dapit, A., Bourini, I.F., Muataz, Z., & Ali, M.Y. (2023). Multicriteria decision making on supplier selection using SOCCER model integrated with analytical hierarchy process. *IIUM Engineering Journal*, 24(2), 239-257. <https://doi.org/10.31436/iiumej.v24i2.2787>.
- Arslan, R. (2018). AHP ile ağırlıklandırılmış VIKOR yöntemiyle araç seçimi: Rent a car firması uygulaması. *Türk Akademik Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 1(1), 15-20.
- Atanassov, K.T. (2020). Circular intuitionistic fuzzy sets. *Journal of Ambient Intelligent and Smart Environments*, 39, 5981-5986.
- Atanassov, K.T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 87-96. <https://doi.org/10.1016/S0165-011480034-3>.
- Bhavsar, D., Jaychandra, P.K., & Mittal, M. (2024). Data acquisition and performance analysis during real-time driving of a two-wheeler electric vehicle-A case study. *World Electric Vehicle Journal*, 15(3), <https://doi.org/10.3390/wevj15030121>.
- Bošković, S., Švadlenka, L., Jovčić, S., Dobrodolac, M., Simić, V., & Bacanin, N. (2023). An alternative ranking order method accounting for two-step normalization (AROMAN)—A case study of the electric vehicle selection problem. *IEEE Access*, 11, 39496-39507.
- Bozanic, D., Tešić, D., & Milićević, J. (2018). A hybrid fuzzy AHP-MABAC model: Application in the Serbian Army—The selection of the location for deep wading as a technique of crossing the river by tanks. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1(1), 143-164.

- Chen, C.T. (2000). Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 1-9.
- Chen, T.Y. (2023). A circular intuitionistic fuzzy evaluation method based on distances from the average solution to support multiple criteria intelligent decisions involving uncertainty. *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 117, 105499. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105499>.
- Cogen, J. (2010). Report of the alternative fuel vehicle infrastructure of working group. USA, Oregon State Report.
- Cuong, B.C. (2014). Picture fuzzy sets. *Journal of Computer and Science Cybernetics*, 30, 409-420.
- Çaloğlu Büyükselçuk, E. & Tozan, H. (2022). Elektrikli araçların performanslarının CRITIC-EATWIOS ile değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10, 1670-1688. <https://doi.org/10.29130/dubited.1002851>.
- Das, M. C., Pandey, A., Mahato, A. K., & Singh, R. K. (2019). Comparative performance of electric vehicles using evaluation of mixed data. *Opsearch*, 56, 1067-1090.
- Deng, J.W., Zhang, J.H., & Yang, S.X. (2024). Optimizing electric vehicle routing with nonlinear charging and time windows using improved differential evolution algorithm. *Cluster Computing-The Journal of Network Software Tools and Applications*, <https://doi.org/10.1007/s10586-023-04243-z>.
- Efendi, A., & Fahmi, A.R. (2021). Design and build of electric car frame SULA evolution. *Journal of Mechanical Engineering Education*, 6(1), 11-21.
- Erdoğan, S. (2020) Enerji, çevre ve sera gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303. <https://doi.org/10.18074/ckuiibfd.670673>.
- Farinloye, T., Oluwatobi, O., Ugboma, O., Dickson, O.F. Uzundu, C., & Mogaji, E. (2024). Driving the electric vehicle agenda in Nigeria: The challenges, prospects and opportunities. *Transportation Report Part D-Transport and Environment*, 130, 104182. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104182>.
- Fu, Y.K., Wu, C.J., & Liao, C.N. (2021). Selection of in-flight duty-free product suppliers using a combination fuzzy AHP, fuzzy ARAS, and MSGP methods. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 545379.
- Garibaldi, J.M., & Ozen, T. (2007). Uncertain fuzzy reasoning: A case study in modelling expert decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15, 16-30.
- Grattan-Guinness, I. (1975). Fuzzy membership mapped onto interval and many-valued quantities. *Mathematical Logic Quartely*, 22, 149-160.

- Güleç, M.A., & Ayvaz, B. (2021). İtfaiye istasyonlarındaki tehlikelerin çok kriterli karar verme yöntemleri ile ölçülmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(39), 127-145.
- Güven, F., & Rende, H. (2017). Elektrikli araçların tasarımında malzeme seçiminin önemi. *Mühendis ve Makine*, 58(689), 81-95.
- Hassan, M.S., Ali, Y., Petrillo, A., & De Felice, F. (2023). Risk assessment of circular economy practices in construction industry of Pakistan. *Science and Total Environment*, 868, 161468. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161418>.
- Huang, Z., Yang, C., Zhou, X., and Gui, W. (2023). An improved TOPSIS-based multi-criteria decision-making approach for evaluating the working conditions of the aluminium cell. *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 117(105599). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105599>.
- Jahn, K.U. (1975). Intervall-wertige Mengen. *Mathematische Nachrichten*, 68, 115-132.
- Jaller, M., & Otay, I. (2021). Evaluating Sustainable Vehicle Technologies for Freight Transportation Using Spherical Fuzzy AHP and TOPSIS. In: Kahraman, C., Cevik Onar, S., Oztaysi, B., Sari, I., Cebi, S., & Tolga, A. (eds) Intelligent and Fuzzy Techniques: Smart and Innovative Solutions. INFUS 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1197. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51156-2_15.
- Kahraman, C., & Alkan, N. (2021). Circular intuitionistic fuzzy TOPSIS method with vague membership functions: Supplier selection application context. *Notes on Intuitionistic Fuzzy Sets*, 27, 24-52. doi: 10.7546/nifs.2021.27.1.24-52.
- Kaur, H., Gupta, S., & Dhingra, A. (2023). Selection of solar panel using Entropy-TOPSIS technique. *Materials Today: Proceedings*, in Press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.034>.
- Kerem, A. (2014). Elektrikli araç teknolojisinin gelişimi ve gelecek beklentileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(1), 1-13.
- Khan, M.J., Alcantud, J.C.R., Kumam, W., Kumam, P., & Alreshidi, N.A. (2023). Expanding pythagorean fuzzy sets with distinctive radii: Disc pythagorean fuzzy sets. *Complex Intelligent Systems*. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01062-y>.
- Khan, M.J., Kumam, W., & Alreshidi, N.A. (2022). Divergence measures for circular intuitionistic fuzzy sets and their applications. *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 116, 105455. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105455>.

- Kijewska, K., Iwan, S., & Malecki, K. (2019). Applying multi-criteria analysis of electrically powered vehicles implementation in urban freight transport. *Procedia Computer Science*, 159, 1558-1567. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019>.
- Kim, G. (2024). Electric vehicle routing problem with states of charging stations. *Sustainability*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/su16083439>.
- Krishnaprakash, S., Mariappan, R., & Broumi, S. (2024). Cubic spherical neutrosophic sets and selection of electric truck using cosine similarity measure. *Neutrosophic Sets and Systems*, 67(1).
- Kutlu Gündoğdu, F., & Kahraman, C. (2019). Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 36, 337-352.
- Manik, M.H. (2023). Addressing the supplier selection problem by using the analytical hierarchy process. *Heliyon*, 9(7). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17997>.
- Meniz, B., Özkan, E.M. (2023). Vaccine selection for COVID-19 by AHP and novel VIKOR hybrid approach with interval type-2 fuzzy sets. *Engineering Applications and Artificial Intelligence*, 119, 105812. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105812>.
- Narang, M., Joshi, M.C., & Pal, A.K. (2021). A hybrid fuzzy COPRAS-base-criterion method for multi-criteria decision making. *Soft Computing*, 25(13), 8391-8399.
- Oprovcovic, S. (2011). Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems and Applications*, 38, 12983-12990. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.097>.
- Ourya, I., & Abderafi, S. (2023). Clean technology selection of hydrogen production on an industrial scale in Morocco. *Results in Engineering*, 17, 100815. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100815>.
- Panchal, D., Chatterjee, P., Shukla, R.K., Choudhury, T., & Tamosaitiene, J. (2017). Integrated Fuzzy AHP-Codas Framework for Maintenance Decision in Urea Fertilizer Industry. *Economic Computation & Economic Cybernetics Studies & Research*, 51(3).
- Pasha, J., Li, B.K., Elmi, Z., Fathollahi-Fard, A.M., Lau, Y.Y. Roshani, A. Kawasaki, T., & Dulebenets, M.A. (2024). Electric vehicle scheduling: State of the art critical challenges, and future recent opportunities. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100561>.

- Pathak, D. K., Shankar, R., & Choudhary, A. (2021). Performance assessment framework based on competitive priorities for sustainable freight transportation systems. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102663. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102663>.
- Pennington, A.F., Cornwell, C.R., Sircar, K.D., & Mirabelli, M.C. (2024). Electric vehicles and health: A scoping review. *Environmental Research*, 251, 118697. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118697>.
- Pouresmaeil, H., Khorram, E., & Shivanian, E. (2022). A parametric scoring function and the associated method for interval neutrosophic multi-criteria decision-making. *Evolving Systems*, 13(2), 347-359. <https://doi.org/10.1007/s12530-021-09394-1>.
- Rani, P., Mishra, A.R., Mardani, A., Cavallaro, F., Streimikiene, D., & Khan, S.A.R. (2020). Pythagorean fuzzy SWARA-VIKOR framework for performance evaluation of solar panel selection. *Sustainability*, 12(10), 4278. <https://doi.org/10.3390/su12104278>.
- Rong, P., & Pedram, M. (2003). An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries. Proceedings of Design, Automation, and Test in Europe Conference and Exhibition, Munich, Germany, 1148-1149.
- Sambuc, R. (1975). *Fonctions ϕ -Floues. Application l'aide au Diagnostic en Pathologie Thyroïdi- Enne*. Ph. D. Thesis, University of Marseille, Marseille, France.
- Sanguesa, J.A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F.J., & Marquez-Barja, J. (2021). A review on electric vehicles: Technologies and challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404.
- Sejwal, R., Pal, S., Singh, N.K., Saini, R., & Yuvaraj, N. (2022). Selection of electric vehicles using MCDM techniques. *Advanced Production and Industrial Engineering*, IoS Press E-Book. <https://doi.org/10.3233/ATDE220801>.
- Senapati, T., & Yager, R.R. (2020). Fermatean fuzzy sets. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11, 663-674.
- Shammut, M., Cao, M., Zhang, Y., Papaix, C., Liu, Y., & Gao, X. (2019). Banning diesel vehicles in London: Is 2040 too late? *Energies*, 12(3495), 1-17.
- Singh, V., Kumar, V., & Singh, V.B. (2023). A hybrid novel fuzzy AHP-TOPSIS technique for selecting parameter-influencing testing in software development. *Decision Analysis Journal*, 6(100159). <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100159>.
- Smarandache, F. (1999). *A Unifying Field in Logics. Neutrosophy: Neutrosophic Probability, Set and Logic*, American Research Press: Rehoboth, DE, USA.

- Sonar, H.C., & Kulkarni, S.D. (2021). An integrated AHP-MABAC approach for electric vehicle selection. *Research in Transportation Business & Management*, 41, 100665. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100665>.
- Tian, G., Lu, W., Zhang, X., Zhan, M., Dulebenets, M. A.; Aleksandrov, A., Fathollahi-Fard, A. M., & Ivanov, M. (2023). A survey of multi-criteria decision-making techniques for green logistics and low-carbon transportation systems. *Environmental Science and Pollution Resources*, 30, 57279-57301. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26577-2>.
- Torra, V. (2010). Hesitant fuzzy sets. *International Journal of Intelligent Systems*, 25, 529-539.
- Türkiye İstatistik Kurumu, (2023). Sera Gazı Emisyon İstatistikleri 1990-2021, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Sera-Gazi-Emisyon-Istatistikleri-1990-2021-49672#:~:text=Sera%20gaz%C4%B1%20envanteri%20sonu%C3%A7lar%C4%B1na%20g%C3%B6re,CO2%20e%C5%9Fd.%20olarak%20hesapland%C4%B1 adresinden 4 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır>.
- Ulutaş, A. (2019). Supplier selection by using a fuzzy integrated model for a textile company. *Engineering Economics*, 30(5), 579-590.
- United Nations (2024). Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/2030agenda> adresinden 1 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- Valavanidis, A. (2018). The shift to diesel fuel engines and how the emission scandal of diesel vehicles unfolded. *World Energy Consumption of Transportation Sector*, 1, 1-26.
- Voelcker, J. (2021). EVs explained: Battery capacity, gross versus net. <https://www.caranddriver.com/features/a36051980/evs-explained-battery-capacity-gross-versus-net/> adresinden 7 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- Wang, L., Ding, Y.F., Chen, Z.Y., Su, Z.Y., Zhuang, Y.F. (2024). Heuristic algorithms for heterogeneous and multi-trip electric vehicle routing problem with pickup and delivery. *World Electric Vehicle Journal*, 15(2). doi: 10.3390/wevj15020069.
- Wang, N., Xu, Y., Puška, A., Stević, Ž., & Alrasheedi, A.F. (2023). Multi-criteria selection of electric delivery vehicles using fuzzy-rough methods. *Sustainability*, 15(21), 15541. <https://doi.org/10.3390/su152115541>.
- Wappelhorst, S. The end of the road? An overview of combustion-engine car phase-out announcements across Europe, <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Combustion-engine-phase-out-briefingmay11.2020.pdf> adresinden 2 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.

- Waseem, M., Amir, M., Lakshmi, G.S., Harivardhagini, S., & Ahmad, M. (2023). Fuel cell-based hybrid electric vehicles: An integrated review of current status, key challenges, recommended policies, and future prospects. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 2, 100121. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2023.100121>.
- Wątróbski, J., Małeckı, K., Kijewska, K., Iwan, S., Karczmarczyk, A., & Thompson, R.G. (2017). Multi-Criteria Analysis of Electric Vans for City Logistics. *Sustainability*, 9, 1453. <https://doi.org/10.3390/su9081453>.
- Web of Science, (2024a). <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/d8d06ffc-b5a9-44a5-82f5-15480441da9a-e9a2d78a> adresinden 1 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- Web of Science, (2024b). <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/a4505764-df3d-46ed-a8a9-a3db304c1cc0-e9b1cc28> adresinden 2 Mayıs 2024 tarihinde alınmıştır.
- World Health Organization, (2024). <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts/climate-impacts-of-air-pollution> adresinden 30 Temmuz 2024 tarihinde alınmıştır.
- Yager, R.R. (1986). On the theory of bags. *International Journal of General System*, 13, 23-37.
- Yager, R.R. (2017). Generalized orthopair fuzzy sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 25, 1222-1230.
- Yager, R.R. (2013). Pythagorean fuzzy subsets. In Proceedings of the Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS), Edmonton, AB, Canada, 24–28 June 2013, 57–61.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information Control*, 8, 338-353. doi:10.1016/S0019-995890241-X.
- Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Science*, 8, 199-249. doi: 10.1016/0020-025590036-5.
- Zimmermann, H.J. (2001). Fuzzy Set Theory and Its Applications; Kluwer Academic Publishers: Alphen aan den Rijn, The Netherlands.
- Zindani, D., Maity, S.R., & Bhowmik, S. (2019). Fuzzy-EDAS (evaluation based on distance from average solution) for material selection problems. In Advances in Computational Methods in Manufacturing, 755-771, Springer, Singapore.



DENİZYOLU TAŞIMACILIĞINDA ÜLKELERİN REKABETÇİLİĞİ VE BAYRAK ÇEKMEDE SEÇİM ÖNCELİKLERİ*

COMPETITIVENESS OF COUNTRIES IN MARITIME TRANSPORT AND FLAG SELECTION PRIORITIES

Mustafa FİDAN¹

Pınar GÜROL²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1578422>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
mustafa.fidan@istanbulticaret.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
03.11.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
03.12.2024

Kabul Tarihi
(Accepted)
05.12.2024

Öz

Uluslararası ticarete önemli bir paya sahip olan denizcilik sektöründeki gemilerin operasyona başlamadan önce yapılması gereken işlemlerden biri olan bayrak çekme işlemi, armatörler için büyük önem taşımaktadır. Bayrak çekme işlemiyle birlikte gemiler bir sicile sahip olmaktadır ve bu sicilde gemilerin sahiplik durumu, tescil tarihi, genel özellikleri ve diğer önemli bilgileri yer almaktadır. Gemi sicili, bankalara, gemi sahiplerine ve sigorta şirketlerine geminin yasal statüsü ve geçmişi hakkında bilgi sağlamaktadır. Bu siciller genellikle ülkelerin denizcilik otoriteleri tarafından yönetilmektedir. Bu çalışmada, denizyolu taşımacılığı alanında faaliyet gösteren armatörlerin bayrak seçimini etkileyen faktörler ve Türkiye'nin bu alandaki rekabetçiliğinin ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek için Michael Porter'ın geliştirdiği Elmas Modeli'ne göre bayrak seçim kriterleri belirlenecek. Belirlenen bu kriterler SWARA yöntemi kullanılarak önceliklendirilecek ve COPRAS yöntemiyle Türkiye'nin rekabetçi pazarında bulunan ülkeler değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: Bayrak çekme, denizcilik, uluslararası ticaret, elmas modeli.

Abstract

Ship registration, which is one of the procedures that must be carried out before the ships in the maritime sector, which has an important share in international trade, start operating, is of great importance for ship owners. With the ship registration procedure, ships gain a registry, and this registry includes the ownership status, registration date, general characteristics and other important information about the ships. The ship registry provides information about the legal status and history of the ship to banks, ship owners and insurance companies. These registries are generally managed by the maritime authorities of the countries. This study aims to determine the factors affecting the flag selection of ship owners operating in the field of maritime transportation and to measure Turkey's competitiveness in this field. To achieve this goal, flag selection criteria will be determined according to the Diamond Model developed by Michael Porter. These determined criteria will be prioritized using the SWARA method and countries in Turkey's competitive market will be evaluated using the COPRAS method.

Keywords: Ship registration, maritime, international trade, diamond model.

* Bu yayın Mustafa FİDAN isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Lojistik Yönetimi Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹ İstanbul Ticaret Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Lojistik Yönetimi Anabilim Dalı / Programı, İstanbul, Türkiye. mustafa.fidan@istanbulticaret.edu.tr, [Orcid.org/0009-0001-3009-7224](https://orcid.org/0009-0001-3009-7224).

² İstanbul Ticaret Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Lojistik Yönetimi Programı, İstanbul, Türkiye. pinargurol@gmail.com, [Orcid.org/0000-0001-7368-1757](https://orcid.org/0000-0001-7368-1757).

1. GİRİŞ

Deniz taşımacılığı, uluslararası ticaretin ve küresel ekonominin omurgası olarak bilinmektedir. Malların uluslararası ticaret hacminin %80'inden fazlası deniz yoluyla taşınmaktadır ve bu oran çoğu gelişmekte olan ülke için daha da yüksektir (UN Trade and Development [UNCTAD], 2021). Deniz taşımacılığının en önemli aracı olan gemilerin operasyonel süreçlerinin en iyi şekilde yönetilmesi, denizyoluyla yapılan ticaretin işleyişini derinden etkilemektedir. Operasyonel süreçlerden biri olan bayrak çekme süreci, bir gemiyi bir devletin bayrağına kaydettirmek, o devlete karşı sorumluluklar yüklemek anlamına gelmektedir. Bunların arasında geminin durumunu, mürettebatını ve operasyonunu kontrol etmek gibi uygulamalar yer almaktadır. Eğer bir gemi bayraksız olursa hiçbir şekilde uluslararası kanun altında korunma hakkına sahip olamamaktadır. Bir geminin uyuşuğu, geminin bölgesel hakimiyetini etkilemekte ve bayrak devletindeki ilişkilerini oluşturmaktadır. Böylelikle devletin vergilendirme sürecine, dış ticaret ve diğer kurallara tabi olmaktadır. Bir gemiyi, bir ülkenin siciline kaydettirmek, o ülkenin kamu kayıtlarına girmesi anlamına gelmektedir. Bu yüzden bayrak çekme yalnızca bir ön koşul değil aynı zamanda bir geminin uyuşunun belirlenmesi olarak düşünülmektedir (Coles & Watt, 1998). Gemi kayıt işlemi, deniz taşımacılığının emniyeti ve güvenliği açısından zorunlu bir işlev olarak görülmekte ve deniz ortamının korunmasına ve muhafazasına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bir geminin uyuşunu belirlemenin genel mekanizması, geminin belirli bir devlette kaydı olarak görülmektedir (International Maritime Organization [IMO], 2024). 2023 yılı verilerine göre Yunanistan, 393 milyon deadweight (ölü ağırlık - DWT) aşan gemi kapasitesiyle ilk sırada yer alırken, onu Çin (302 milyon DWT) ve Japonya (238 milyon DWT) takip etmektedir. Sahip olunan toplam DWT hem Singapur'da hem de Hong Kong'da (Çin) 100 milyonun üzerindedir. En büyük beş gemi sahibi ekonominin birleşimi, dünya filosu tonajının %53'ünü oluşturmaktadır. Liberya (378 milyon DWT), Panama (365 milyon DWT) ve Marshall Adaları (299 milyon DWT), tescil edilen önde gelen bayrakları temsil etmektedir. Panama'nın sicil kaydı büyüklüğü son on yılda neredeyse hiç değişmemiş olsa da Marshall Adaları ve Liberya bu büyüklüğe yetişmiştir ve Liberya'nın kayıtları 2018'den bu yana hızla artmıştır (UNCTAD, 2024).

Denizcilik sektöründe açık, kapalı ve ikinci sicil (yarı açık) olarak üç ana sicil kayıt sistemi bulunmaktadır. Kapalı gemi sicili, en eski gemi sicil sistemidir. Kapalı gemi sicili sistemine dahil olarak bazı ülkeler, gemilerinin yalnızca vatandaşları ya da şirketleri tarafından yönetilmesine izin verirken, bazıları ise vatandaş olmayan ancak ülkelerinde kalıcı yerleşime sahip olan kişilerin gemileri yönetmesine izin vermektedir. Kapalı gemi sicilinin daha katı hale getirmiş ülkelerde ise tüm mürettebatın, geminin sahiplerinin ve ortaklarının o ülke vatandaşı olma zorunluluğu getirilmiştir. Kapalı, aynı zamanda ulusal gemi sicili olarak bilinen bu sicil türünün geminin sahibinin, mürettebatının hatta inşasının bile o ülke içerisinde yapılmasını şart koşmaktadır (Galley, 2013). Öte yandan, açık gemi sicilinin en önemli özelliği, devlet için gelir akışını geliştirmek olarak bilinmektedir. Bir diğer önemli özelliği ise denizcilikle ilgili ekonomik ilişkileri ilerletmek olarak görülmektedir (Hosanee, 2009). Düşük vergilendirme süreçleri, gemi sahibi üzerindeki nispeten esnek uygulamalar, hafifletilmiş mürettebat gereklilikleri ve kurallara katı bir şekilde uyulmama gibi özellikler çoğu açık gemi sicillerinde bulunmaktadır. Literatürde açık gemi sicili, aynı zamanda kolay bayrak olarak da adlandırılmaktadır (Balık, 2023). Açık gemi sicilinin avantajları genel olarak şöyle sıralanmaktadır: gemilerin kendi ülkelerinin

vatandaşlarına veya şirketlerine sahip olması zorunluluğunun aranmaması, gemiler yabancı uyruklu kişiler veya şirketler tarafından açık gemi siciline sahip ülkelere kaydettirebilmesi, yabancı uyruklu mürettebata izin verilmesi, kayıt ücretleri ve vergilerin oldukça düşük olması (Yuanyuan, 2021). Geleneksel ülkeler tarafından gemilerinin kendi ulusal sicillerinden tamamen uzaklaşmadan kontrolü elinde tutması için kurulmuş bir sicil olan ikinci gemi sicilleri ya da uluslararası siciller, “ulusal bayrak sicili kurallarından farklı koşulların yaratıldığı ancak ulusal bayrağın kullanılmasına izin verilen siciller” olarak da bilinmektedir (Tanaka, 2015). Kapalı sicil ve açık sicil arasında bulunan ikinci gemi siciline sahip olan bayrak devletleri, aynı anda hem kapalı sicillerini hem de ikinci sicillerini yürütmektedirler. Bu uygulamayı seçen ülkelerin amacı, ülkelerine kayıtlı gemilerin kendi ülkelerinden açık sicillere transferlerini engellemektir. İkinci gemi sicilleri, kapalı sicillere göre daha seyreltilmiş kurallara sahiptir (Hamad, 2016). Öte yandan, ikinci gemi sicili, gemi sahiplerine kolay bayrak siciline benzer avantajlar sağlanmaktadır (Karataş & Şimdi, 2019). Bu gemi sicil türü, etkili denizcilik idaresi, uygulanabilir kuralları, standartları, ülke bazlı çalışmalar ve iş imkanları sayesinde filolarını daha iyi kontrol etmeyi sağlamıştır (Anderson & Fitzpatrick, 2005).

Dünyada bazı ülkeler gemi sicil kuralları sayesinde yabancı armatörlere kendi bayraklarını tercih edebilme imkânı sunmaktadır. Gemi sicili uygulaması ülkeler arasında bir pazar olarak görülmektedir ve bu da ülkeler arasında rekabetçiliği sebebiyet vermektedir. Özellikle, açık gemi sicillerinin kapalı sicillere oranla daha çok tercih edilmesi açık gemi siciline sahip olan ülkelerin armatörlere sunduğu fırsatlar sayesinde (Haider, 2013; Rogers, 2010; Shaheen, 2016). Türkiye ise 1999 yılı sonunda kurmuş olduğu Türk Uluslararası Gemi Sicili (TUGS) ile uluslararası pazarda rol sahibi olmuştur (Celik ve ark., 2009).

Bu bağlamda çalışmada denizyolu taşımacılığında firmaların bayrak seçimini etkileyen faktörler ve Türkiye'nin bu alandaki rekabetçiliğinin ölçülmesi amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ulusların rekabet avantajını değerlendirmek için Michael Porter'ın geliştirdiği Elmas Modeli'ne (Porter, 1990) göre bayrak seçim kriterleri belirlenecek, belirlenen bu kriterler SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis-Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi) ile önceliklendirilecek ve COPRAS (Complex Proportional Assessment-Karmaşık Orantılı Değerleme) ile Türkiye'nin rekabetçi pazarında yer alan ülkelerin değerlendirmesi yapılacaktır.

Bu çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın amacının sunulduğu giriş bölümünden sonra ikinci bölümde gemiler için bayrak sicil seçimi ile ilişkili literatür incelenmiş, elmas modeli açıklanmıştır. Üçüncü bölümde; bu çalışmadaki bayrak seçim kriterleri ve değerlendirilen ülkeler hakkında detaylı bilgi verilerek çalışmaya yönelik kavramsal çerçeve oluşturulmuş, SWARA ve COPRAS metodunun kullanım alanlarına yönelik literatür taraması yapılmış ve yöntemlerin teorik altyapılarına değinilmiştir. Dördüncü bölümde bütünlük SWARA ve COPRAS metodu ile analizler yapılacaktır. Son bölümde, analiz sonuçları yorumlanarak bayrak seçiminde ulusların rekabetçiliği değerlendirilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Gemi Bayrak Sicil Seçimi

Gemiler için bayrak seçiminin armatörler tarafından hangi kriterlere bağlı olarak yapıldığına dair birçok çalışma yürütülmüştür. Açık, kapalı ve ikinci sicilleri değerlendirerek yapılan çalışmalar, gelişmiş modeller kullanılarak literatüre katkı sağlamıştır. Aşağıda bu çalışmalardan bazılarına değinilmiştir.

(Chung & Hwang, 2005)'un çalışmasında Tayvan'daki dökme yük taşımacılığı firmalarının gemi kayıtlarına olan etkisini ölçmek için, AHP yöntemi ile uygulanan dört farklı hedef yönünden oluşan hiyerarşik bir analiz çerçevesi geliştirilmiştir. Beş seçilmiş kamu dökme yük taşımacılığı firmasının operasyonel performansları Veri Zarflama Analizi (VZA) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Girdiler ve çıktılar üretim fonksiyonu kavramlarına göre seçilmekte ve küçük örneklem büyüklüklerinin sınırlamasını aşmak için pencere analizi yöntemi kullanılmıştır.

(Bergantino & Marlow, 2006) ise çalışmalarında, ekonometrik bir yaklaşım kullanarak Birleşik Krallık taşımacılık sektöründe gerçekleştirdikleri anketler ve kişisel görüşmeler vasıtasıyla orijinal verilere ulaşmışlardır. Çalışmalarının sonuçları, tanker ve kargo gemileri olmak üzere iki gemi tipi ile ilgili olmuştur ve bayrak çekme olgusunun temel olarak gemi sahibinin hem maliyetleri hem de işletme özgürlüğü üzerindeki kısıtlamaları en aza indirme arzusunun kaynaklandığı yaygın olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmanın nicel kısmı, geminin yaşı, faaliyet gösterdiği ticaret, temel ücret maliyetleri, ulusal sigorta ödemeleri ve eğitim maliyetleri gibi faktörlerin bayrak çekme kararında önemini doğrulamıştır.

(Kandakoglu ve ark., 2009) çalışmalarında, birden fazla kriter altında gemi sicil seçimine ilişkin kritik karar sürecini desteklemek için SWOT analizi, AHP ve TOPSIS yöntemlerinin sistematik uygulamasına dayalı bir yaklaşım önermektedir. Önerilen yaklaşımda, SWOT analizi gemi sicil seçimi kararındaki temel değerlendirme faktörlerini belirlemek ve karar hiyerarşisini yapılandırmak için kullanılmıştır. AHP bu karar hiyerarşisinde değerlendirme kriterlerinin göreceli önemini ölçmek için kullanılırken, TOPSIS gemi sicil seçimi alternatiflerini sıralamak için uygulanmıştır.

(Haider, 2013) çalışmasında, gemi kayıtlarına genel bir bakış sunarak değişen küresel ekonomideki yeni eğilimleri ele almaktadır. Eyalet bazında bayrak giriş/çıkışını incelemek için bir panel veri analizi uygulamaktadır. Kapalı gemi sicili ile açık gemi sicili arasındaki net ayrımın azaldığını ve iki bayrak türü arasında bir yakınlaşma gözlemlendiğini belirtmektedir.

(Fan ve ark., 2014) çalışmalarında, Lloyd's gemi sicilindeki gerçek gemi kayıt verilerini Paris MOU (Paris Liman Devleti Kontrolü Mutabakatı), Tokyo MOU (Tokyo Liman Devleti Kontrolü Mutabakatı) ve Hindistan MOU (Hindistan Liman Devleti Kontrolü Mutabakatı)'dan almış olduğu Port State Control (PSC - Liman Devleti) kayıtlarıyla birleştirilerek, bayraktan çıkma kararları için ikili bir lojistik regresyon modeli ve doğrusal bir model olan Üç aşamalı en küçük kareler (3AEKK) yöntemine entegre etmiştir. Deneysel sonuçlar, PSC denetimlerinin aslında bayrak çekme olasılığını artırdığını göstermektedir. Bu artış, yalnızca yüksek denetim oranı nedeniyle değil, aynı

zamanda gemi yaşı gibi denetim önceliğinin belirlenmesinde kullanılan değişkenler aracılığıyla da gerçekleştirilmektedir.

(Alcaidea ve ark., 2016) çalışmalarında gemileri hurdaya çıkarmak için seçilen en yaygın bayrakları analiz etmişlerdir. Devletler ve gemi söküm endüstrisi arasındaki ilişkiyi belirlemek için araştırma çok değişkenli istatistik tekniği kullanılarak yürütülmüştür. Sonuçlar, gemi sicil seçimi ile yalnızca hurdaya çıkarma amacıyla yeniden bayrak seçimi yapan ve hurdaya gönderilmek üzere olan gemiler arasında bir ilişki olduğunu göstermektedir.

(Mitroussi & Arghyrou, 2016) çalışmalarında, gemi kayıtlarında yeni bir kavram olan net bayraktan çıkma oranını tanıtmaktadır. Korelasyon ve Regresyon analizleri kullanılarak yapılan çalışmada yolsuzluk metriklerinin ve kurumsal önlemlerin bayrak seçimini açıklamada belirleyici faktörler olarak potansiyel katkısını incelemektedir.

(Köseoğlu ve ark., 2017) çalışmalarında, Türk ticaret filosunda önemli rol oynayan denizcilik şirketlerinin ve gemi sahiplerinin bayrak seçimi kararını etkileyen faktörleri belirlemiştir. Bu karar üzerinde önemli etkileri olan faktörlerin ilişki durumu veri madenciliği uygulamasıyla gösterilmiştir. Elde edilen çıktılarla Yapay Sinir Ağları uygulaması gerçekleştirilmiş ve bayrak seçimi kararı için bir model önerilmiştir.

(Chou, 2018) çalışmasında gemi sahipleri tarafından gemi bayrak sicili seçimi için çok kriterli karar verme analiz hiyerarşisini yapılandırmaktadır. Sicil seçimi karar verme prosedüründe etkili faktörleri bulmak için Analitik Ağ Süreci (ANP) metodolojisi kullanmıştır. Temel hiyerarşi yapılandırıldıktan sonra, ANP modeli Tayvan gemi siciline uygulanmıştır. Sonuçların işletme maliyetlerinin en önemli faktör olduğunu, bunu piyasa koşulları, ulusal politikalar ve yasalar ile uluslararası yasalar ve kısıtlamaların izlediğini göstermektedir. Taşıma vergilendirmesi, finans koşulları, ticaret kısıtlamaları ve engelleri, mürettebat maliyetleri ve teşvikler en önemli beş alt kriterdir. Açık gemi sicili olarak bilinen elverişli bayrak sistemi, bir gemi sicili sistemi olarak en iyi seçimin olduğu, bunu ikinci gemi sicili takip ettiği bulunmuştur.

(Yin ve ark., 2018) çalışmalarında ikinci gemi sicilinin bayrak seçimi mekanizması üzerindeki etkisini, lojistik regresyon modeli ile incelemiştir. Ampirik tahmin, ikinci gemi sicilleri kurma politikasının, gemilerin kendi ülkelerine gemi kayıt sayısını önemli ölçüde etkilediğini, ancak bu etkinin farklı ülkeler için değiştiğini öne sürmektedir. Bu çalışma, Çin'in denizcilik politikasını, denizcilik şirketleri için rekabetçi bir operasyonel ortam sağlamak ve böylece bir denizcilik faaliyetlerini teşvik etmek için Hong Kong'u ikinci gemi siciline dahil ederek yeniden yönlendirmesini önermektedir.

(Okpara, 2020), çalışmasında Nijerya'nın Rivers Eyaletindeki yerel gemi sahipleri ve operatörlerinin gemi kayıt politikasının etkisini incelemiştir. Bu çalışmadaki hipotezlerin testinden, gemi sicil kayıt politikasının Rivers Eyaletindeki yerel gemi sahipleri ve operatörlerinin istihdamında artış ve yerel gemi operatörleri tarafından hükümete sağlanan gelir arasında anlamlı bir ilişkinin olduğu ortaya çıkmıştır.

(Park ve ark., 2022) çalışmalarında açık gemi siciline bir cevap olarak Kore'de 2003 yılında kurulan ikinci gemi sicili sistemi Jeju Özel Gemi Kayıt Bölgesi Sistemi'ne

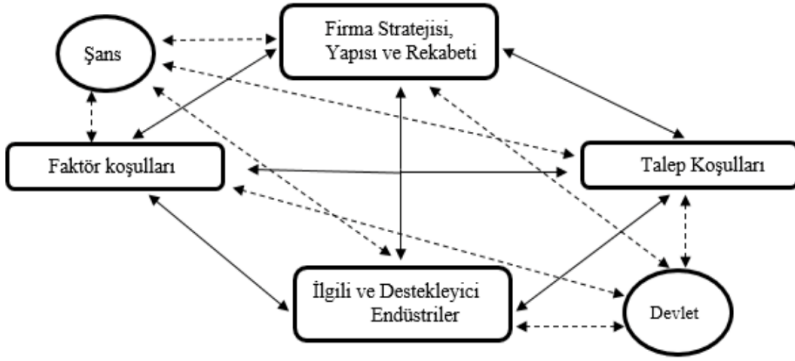
değmişlerdir. Bu sistemin performansının ulusal ekonomi üzerindeki etkisini analiz etmek için sentetik kontrol yöntemini kullanarak Jeju Özel Gemi Kayıt Bölgesi sisteminin performansını nicel olarak değerlendirerek bu alanda ilk çalışmaya imza atmışlardır.

(Chen ve ark., 2024) ise çalışmalarında, küresel uluslararası gemi kayıt sisteminin gelişim sürecini ve temel özelliklerini karşılaştırmalı analiz kullanarak işlemişlerdir. Bu sistemdeki temel sorunları belirterek dünya çapında uluslararası gemi kayıt sisteminin inovasyonu ve yönetimi için önemli yönler önermektedirler. Küresel uluslararası gemi kayıt sisteminin gelişim geçmişini gözden geçirerek, uygulanmasındaki temel sorunları değerlendirerek ve gelecekteki reform ve yönetim yönlerini oluşturarak, küresel denizci ulusların gemi kayıt politikası reformları için politika inovasyon önerileri sunmayı amaçlamışlardır.

2.2. Elmas Modeli

Bu çalışmada kullanılacak olan Elmas Modeli, ilk olarak Amerikalı strateji profesörü olan Michael Porter tarafından 1990 yılında yayınlanan “Ulusların Rekabet Avantajı” kitabında bahsedilmiştir (Diallo, 2021). Porter’ın çalışmaları arasında dikkat çeken elmas modelinde ulusların rekabetçilik avantajlarını karşılaştırmalı üstünlükler teorisi temelinde daha iyi hale getirecek strateji analizlerinin yapılmasında öncülük eden farklı bir yorumlama yapmaktadır (Eren, 2013). Bir ülkenin refah seviyesine ulaşma amacı o ülkenin uluslararası rekabet ortamında nasıl ilerlediğiyle doğrudan bağlantılıdır. Bu yüzden o ülkedeki şirketlerin nasıl rekabet ettiği uluslararası rekabet ortamında hangi konumda olacağını da belirlemektedir (Herciu, 2013). Bu modeli oluşturan ana temalar, bir ülkede faaliyetini sürdüren işletmelerin ortaya çıktığı ve rekabet ettiği bir yapıyı kapsamaktadır. Belirtilen bu yapı ise belli bir sektördeki rekabet avantajı için var olan kaynağın nasıl kullanılacağını, bulunan fırsatların ve kaynakların idare edilme şeklini, işletmeyi yöneten ekibin rekabet etme sürecindeki koyduğu hedefleri nasıl yöneteceğini oluşturmaktadır (Keser, 2011). Bu modelde aynı zamanda bazı faktörler bulunmaktadır. Bu faktörler mikro ekonomik ve makro ekonomik olarak ikiye ayrılmaktadır. Modelde bir faktörün aktif hale gelmesi için diğer faktörlerin durumunu incelemek gerekmektedir. Daha detaylı açıklamak gerekirse, bir faktör tek başına yeterli olmamakta, diğer faktörlerle uyum içerisinde olarak rekabet avantajı elde edilebilmektedir (Erarşlan ve ark., 2007).

Global rekabet ortamında doğrudan etkili olan mikro faktörler, Faktör Koşulları, Talep Koşulları, İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar ve Firma Yapısı ve Stratejisi şeklinde sıralanmıştır. Bu dört mikro faktörler haricinde rekabetleri dolaysız bir şekilde etkileyen iki makro faktör olan Devlet ve Şans faktörleri de bulunmaktadır (C. Erkan & H. Erkan, 2004). İlgili elmas modeli Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Elmas Modeli

Faktör koşullarını oluşturan temel etkenler genel olarak bilgi kaynakları, altyapı, fiziki kaynaklar, hammadde, teknolojik kaynaklar ve yöneticilerin yetkinlikleriyle birlikte inovasyonu kapsamaktadır. Porter faktör koşullarını iki gruba indirmişdir. Bunlar gelişmiş faktörler ve temel faktörler şeklinde sıralanmaktadır. Gelişmiş faktörlerde enerji, hammadde ve insan kaynakları şeklindeki kaynakları sıralarken, temel faktörlerde ise insan kaynakları, teknoloji ve bilgi şeklindeki uzmanlık isteyen kaynakları sıralamıştır. Temel faktörler oluşturulması basit olarak görülmektedir, gelişmiş faktörler ise rekabet avantajı için daha çok önem arz etmektedir (Riasi, 2015).

Talep Koşulları, müşterilerin süreklilik isteyen kalite ve çeşitlilik talepleri, işletmeleri zamanla yenilik yapmaya zorlamaktadır. İşletmeler, yeni hizmetler ve ürünler gerçekleştirerek rekabet ortamında ön plana çıkmayı amaçlamaktadırlar. Buldukları pazarda talep oranının fazla olması halinde işletmeler, daha fazla yatırım yapmak için bütçelerini buldukları pazar için arttırma yoluna gitmektedir (Gümüş & Bayat, 2021).

İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar, bir ülkenin iç pazarındaki güçlü sektörlerde yer alan işletmeleri doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen destekleyici sektörel kuruluşlar bulunmaktadır. Bu kuruluşların büyümesi ve gelişmesi, ülkenin önemli sektörlerindeki işletmelerin ilerlemesini sağlamaktadır. Porter'a göre bu kuruluşlar desteklendikçe ülke ekonomisine katkı sağlayan firmalar da aynı şekilde güçlenmektedir (Hızıroğlu & Gümüş, 2015).

Firma Yapısı ve Stratejisi, işletmelerdeki yönetim ekibinin şirket içindeki ekibi nasıl oluşturduğunu ve yönettiğini gösteren faktörleri kapsamaktadır. Belirli bir sektörde rekabet gücü, o ülkede uygulanan yönetim ve organizasyon uygulamalarıyla ve nasıl yönetildiğiyle belirlenmektedir (Hızıroğlu & Gümüş, 2015). Oluşturulan ekipteki motivasyonunun önemi ve rekabet etme yöntemleri de önem arz etmektedir (Gültekin, 2017).

Şans Faktörü, genellikle hiçbir şekilde öngörülemez gelişmeleri göstermektedir (Diallo, 2021). Şans faktörünün uluslararası bir pazarda rekabet gücüne sahip olan işletmelerin başarılı veya başarısız olmalarıyla ilgili görülmektedir. Sektörlerdeki firmalar bazen olumsuz olaylarla karşılaşabilirken bazen de yepyeni fırsatlar karşılına

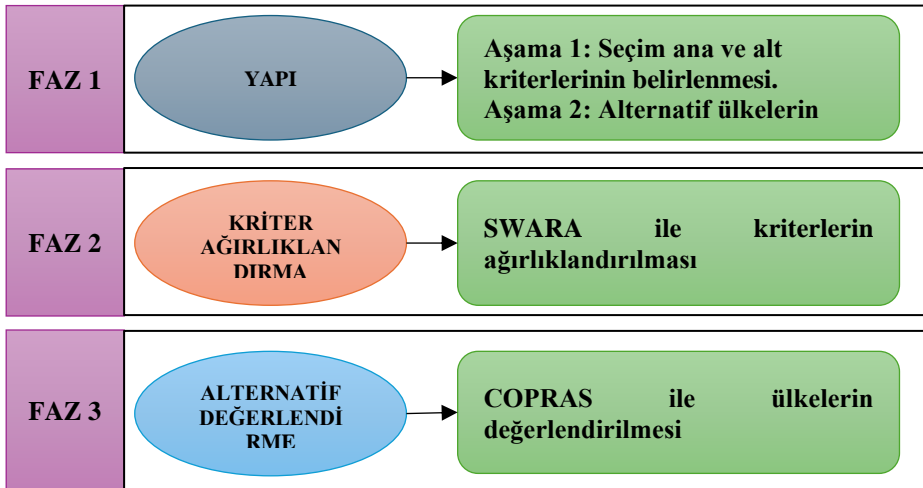
çıkarak firmalarında olumlu etkilere sahip olabilmektedirler (Hızıroğlu & Gümüş, 2015).

Devlet Faktörü, işletmelerin uluslararası anlamda rekabet gücünü elde etmeleri için devletlere düşen bazı sorumluluklar bulunmaktadır. Bu sorumluluklar arasında sektörteki işletmelerin performanslarını yükseltmek için imkanlar sağlamak, tekelleşmeyi önlemek, talep görecekt potansiyel ürünleri önceden görüp bilgilendirmek vardır (Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği [TOBB], 2012). Ülke içerisindeki maliye ve para politikalarıyla birlikte eğitim de önemli bulunmaktadır (Diallo, 2021). Devletin yasalar, düzenlemeler ve korumacı politikalarıyla güçlü bir etkinliğinin olduğu bilinmektedir (Gültekin, 2017).

3. KAVRAMSAL VE METODOLOJİK ÇERÇEVE

3.1. Metodolojik Çerçeve

Günümüzde gerek kurumsal gerekse bireysel işlemlerimiz için birden fazla kriteri dikkate alarak küçük veya büyük ölçekli karar almak zorunluluk haline gelmiştir. Bu çalışmada amaçlanan denizyolu taşımacılığında bayrak seçimini etkileyen faktörler ve Türkiye'nin bu alandaki rekabetçiliğinin değerlendirilmesidir. Bu amaçla, öncelikle literatür taramasıyla elde edilmiş değerlendirme kriterlerinden bahsedilerek. Ardından, Türkiye ve Türkiye'nin rekabetçilik içinde bulunduğu ülkeler hakkında bilgi verilecektir. Kullanılacak çok kriterli karar verme yöntemlerinden kriter önem düzeylerinin belirlenmesi için SWARA ve alternatif ülke değerlendirmeleri için COPRAS hakkında literatür incelemesi ve yöntemlerdeki aşamalar aktarılacaktır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de uygulanacak metodoloji fazlar bazında belirlenmiştir.



Şekil 2. Metodoloji

3.2. Kriterlerin Belirlenmesi

Yapılan literatür taramasında aşağıdaki kriterler belirlenmiştir.

Mürettebat Vatandaşlık Özgürlüğü (K1): 1980'lerde yaşanan uzun kriz sürecini takiben gemi sahipleri ya denizcilik sektörünü terk etmiş ya da açık gemi sicillerine geçiş yapmışlardır. Özellikle 1950'lerden beri Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bu sıkça görülmektedir. Bunun sonucunda dünyada gemiler için mürettebat iş alımlarını yöneten şirketler oluşmaya başlamıştır. 21. Yüzyılın başlarında ise bu şirketler Almanya, ABD, Hong Kong, Singapur, Yunanistan gibi ülkelerde bulunmaktadır ve mürettebat işe alımı pazarının çoğunu bu ülkeler yönetmiştir. Bu ülkelerle birlikte Uluslararası Gemi Yöneticileri Birliği kurulmuş ve bu üye ülkeler 1800 adet gemiyi yönetmiştir. Bu gemilerin %80'lik kısmı da açık gemi sicillerinde kaydolmuştur. Açık gemi siciline kaydettirmelerinin başlıca sebebi mürettebat maliyetlerini en aza indirmektir. Bu gemi sicil türündeki yabancı mürettebat alımı sayesinde mürettebat işe alımında daha özgür hissetme imkânı tanınmıştır (Silos ve ark., 2011). Açık gemi sicili kanunları küresel işçi havuzundan ucuz mürettebat çekmeye izin vermektedir. Özellikle düşük asgari ücret ve yetersiz yaşam koşulları olan ülkelere mürettebatın seçildiği görülmektedir. Düşük işçi maliyetleri açık gemi sicillerinin tercih edilmesinin en büyük sebebidir (Fossen, 2016).

Bayrak Rengi (K2): PSC rejimleri arasında en önemlisi olarak değerlendirilen Paris MOU tarafından her sene yayınlanan Kara, Gri ve Beyaz liste, armatörlerin takip ettiği ve bayrak seçiminde büyük önem arz eden bir listedir. Her sene yayınlanan listedeki gemiler üç seneyi kapsayan denetimlerin sonucunda bir puanlamaya tabi tutulur ve performansa göre bayrak rengi belirlenmektedir. Bu sayede bayrak devletin yüksek ve düşük riskli olup olmadığı anlaşılabilir (Bolat & Alpaslan, 2021). Yüksek derecede tutuklanma oranlarına sahip olan bayraklar kara listede, orta derecede tutuklanma oranına sahip olan ülkeler gri listede, düşük derecede tutuklanma oranına sahip olan ülkeler ise beyaz listede yer almaktadır (Hickman, 2012). Paylaşılan bu listede tüm bayrak tipleri yer almaktadır. Kolay bayrak ülkelerinin sayısındaki keskin artış, gemi sahiplerinin ilgisini çekmek için bir mücadelede aralarında yeni rekabet biçimlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Armatörler için ilk izlenim, bayrak devletin Paris MOU'nun yayınladığı listede hangi renkte olduğudur. Bayrağın güvenilirliği, armatörler için, bir geminin uğrak limanlarında tutuklanma riskini azaltmaktadır. Geminin seyrüsefer halinin devamlılığı geminin istikrarlı performansına güvenilirliğini artırmaktadır. Bu da bir gemi sahibinin geminin tüm çalışma süresi boyunca iyi ücretlerle kiralanmasına imkân vermektedir (Akimova ve ark., 2013). Gemiler, ömürlerinin tamamlamaya yakın zamanda sökülmeğe gönderilmeden önce geçici olarak bayrak ve mülkiyet değişikliklerine girmektedir. Paris MOU tarafından yayınlanan listede beyaz listede bulunan gemiler söküm işleminden hemen önce genellikle gri veya kara listedeki ülkelere transfer edilmektedir (Alcaidea ve ark., 2016).

2024 yılında yayınlanan verilere göre aralarında Birleşik Krallık, Kıbrıs, Çin, Türkiye, Marshall Adaları, Liberya gibi toplam 42 ülke beyaz listede yer alırken, 2023 yılında beyaz listeden gri listeye düşen Panama ile Saint Vincent ve Grenadinler, Cook Adaları, Saint Kitts ve Nevis gibi denizcilik ülkeleri gri listede yer alan 17 ülkenin içinde

bulunmaktadır. Beyaz ve gri liste dışında kalan kara listede ise 12 ülke bulunmaktadır. Bu ülkeler arasında denizcilik ülkeleri olan Palau, Vanuatu ve Comoros yer almaktadır (Paris MOU, 2024).

Gemi Yaşı (K3): Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı'nın yayınlamış olduğu Gemilerin Teknik Yönetmeliğine göre gemi yaşı, omurganın konulma veya blok inşaatının başlangıç tarihinden itibaren hesaplanan zaman olarak bilinmektedir. Avustralya Deniz Emniyeti İdaresi'ne göre 15 yaş ve üstü gemiler yüksek riskli, 10-14 yaş arası orta-yüksek riskli, 5-9 yaş arası orta-düşük riskli, 5 yıldan az yaşlı gemiler ise düşük riskli olarak değerlendirilmektedir (Tozar & Güzel, 2012). Bazı bayrak devletleri arasında, sicillerine kabul edecekleri gemilerin yaşını sınırlayarak kolay bayrak etiketinden uzaklaşma yönünde bir hareket vardır. Bu yüzden gemi sahipleri de geminin yaşına göre bayrak seçmeyi dikkatlice yapmak zorundadır. Örneğin açık gemi sicillerinden Liberya ve Vanuatu, 20 yaş sınırı uygularken, Kıbrıs 17 yaş ve Bahamalar kayıt sicili ise 12 yaş sınırı uygulamaktadır. Ancak daha yaşlı gemiler bayrak çekme öncesi denetim ile kabul edilebilir (Galley, 2013). Bir armatörün gemisi için yabancı bir bayrak seçme olasılığı gemi yaşıyla birlikte azalır. Bu sonuç, açık sicillerin genellikle standart altı gemilerle ilişkilendirilme eğiliminde olması ve dolayısıyla daha eski olma olasılıklarını yükseltmektedir. Bazı sicillerin daha genç ve yüksek tonajlı gemileri çekmek için girişimlerde bulunması, onlara indirimler ve diğer avantajlar sağladığı bilinmektedir. Ayrıca, daha eski gemiler uluslararası standartlara uymakta ve bu nedenle uluslararası ticaret yapmakta zorlanmaktadır (Hoffmann ve ark., 2005).

Gemi Rotası (K4): Gemi rotası, bir geminin yükünü yüklediği ve boşalttığı limanlara ulaşmak için izlediği güzergahtır. Bu güzergâh kapsamında da bayrak seçimi önem kazanmaktadır. İzlediği güzergâh üzerinde uğrak limanlarının ülkeleri ve o ülkelerin yasaları önemlidir. İlaveten eğer geminin taşıdığı yük, kabotaj mevzuatı kapsamında ise farklı uygulama söz konusudur. Deniz kabotaj mevzuatları ve politikaları, ülkenin ulusal ticaret araçlarına karasularında ticari faaliyetler yürütme hakkını saklı tutmaktadır. Bu, bir geminin milliyetinin ve mülkiyetinin öneminin bir yükümlülük ve sorumluluk perspektifinden ziyade ulusal bir kalkınma perspektifinden görüldüğünün bir göstergesidir. Bu nedenle, gemilerin o ülkenin vatandaşlarına ait olması ve o ülkede kayıtlı olması gerektiğini öngören ulusal kabotaj mevzuatları, ulusal ekonomik kalkınmanın kolaylaştırılması amacıyla tasarlanmıştır. Bunun sonucunda ulusal sularda ticari aktivite yapmak isteyen armatörler kendi ülkelerinde sicil tercihi yapmaktadır (Akpan, 2016).

Deadweight Oranı (K5): Ölü Ağırlık Tonajı (DWT), bir geminin kargo, yakıt, su, erzak ve mürettebat dahil olmak üzere tam yüklü halde taşıyabileceği maksimum ağırlığı ifade eden bir denizcilik terimidir (McKittrick, 2015). 2022 yılında dünyadaki gemi sicilleri arasında ilk 10 sıralamasında yedi ülke açık sicil ülkeleri olan Panama, Liberya, Marshall Adaları, Malta, Bahamalar, Hong Kong, Çin ve Singapur olurken, geriye kalan üç ülke olan Çin, Yunanistan ve Japonya, kapalı sicil ülkeleriydi. Bu on ülke, dünyanın toplam DWT oranının %78,5'ini temsil etmekteydi (UNCTAD, 2023). Küresel gemi filosunun DWT tonajı artarken, geleneksel denizcilik ülkelerinin ulusal gemilerinin DWT'si azalmaktadır. Açık gemi sicili sahibi gemiler, birçok geleneksel denizcilik ülkesinde ulusal gemilerin yerini almak üzere sürekli olarak büyümektedir (Chung & Hwang, 2005).

Taşınan Yük (K6): Petrol ve doğal gaz gibi sıvı yükleri taşıyan gemiler tanker gemi olarak bilinirken, tahıl, kömür, demir, tuğla gibi malları taşıyan gemilere ise kuru yük gemisi denilmektedir. Tankerlerin, konteynır ve kargo gemilerine kıyasla ulusal bayraklarında kaldığı görülmektedir. Bunun en önemli sebebi petrol sızdırma riski ve sıkı çevresel koruma kurallarının olmasıdır. Petrol tankerlerinin yüksek güvenlik gereksinimleri dünya çapında oldukça yüksektir ve yabancı bayrak devletleri tarafından tamamen sağlanamamaktadır. Kuru yük gemileri sıkı kurallar ve kısıtlamalardan kaçınmak için başka bir bayrağa geçerken, petrol gemilerinin başka bayrağa geçmesinin maliyet olarak ciddi bir farkı yoktur (Haider, 2013). Ancak tanker işleten bazı armatörler, sicil kayıt ücretleri, bakım masrafları ve ekstra yasal gerekliliklerden kaçınmak için daha düşük güvenlik seviyesine sahip olan açık gemi sicillerine kayıtlarını yaptırmaktadır. Sonuç olarak ise açık gemi sicilinde kayıtlı olan tankerler, kapalı sicile sahip olan tankerlere göre daha fazla kazaya karışmaktadır. Bir açık gemi siciline sahip olan Marshall Adaları'na kayıtlı olan tankerlerin, kapalı sicillere oranla %2.767 daha az kazaya karıştığı görülürken yine açık gemi siciline sahip olan Panama ve Liberya ise kapalı sicillere oranla sırasıyla %9.9 ve %8.0 daha fazla kazaya karışmaktadır (Mengjie ve ark., 2019). Bazı petrol şirketleri kendi denetim programlarına sahip oldukları için bu denetimlerle gemilerin çevresel uygunluk ve işletme kurallarına uyumluluğunu sağlayarak olası bir tutuklanmayı önlemeyi amaçlamaktadır (Arıcan & Kara, 2023).

Klas Kuruluşlar (K7): Klas kuruluşlar, gemilerin fiziki durumlarının belirlenmesi, denetim ve incelemeler gerçekleştirme süreçlerinde derecelendirme ve sertifikasyonu sağlayan kuruluşlardır (Kaya A. Y., 2013). Yaşlı gemiler ve Uluslararası Klas Kuruluşlar Derneği (International Association of Classification Societies - IACS) üyesi olmayan klas kuruluşların denetime çıktığı gemiler genellikle kendi ülkelerinde kalmaktadır. Gemi türlerinden yaşına ve klas kuruluşlarına kadar Panama ve Antigua bayraklı gemilerin Liman Devleti tarafından daha düşük ihtimalle tutuklanabileceken, örneğin St. Vincent ve Grenadinler, Belize, Honduras ve Boliviya gibi ülkelerin gemileri Liman Devleti tarafından daha yüksek ihtimalle tutuklanmaktadır (Hoffmann ve ark., 2005). Açık sicil ülkelerinin neredeyse hiçbiri, filolarına kayıtlı gemilerin özel denetimini gerçekleştirmek için yeterli personele veya kaynağa sahip olmadığından, bu faaliyeti bu klas kuruluşlara devretmektedirler. Bu kuruluşlar önemli bir kamusal işlevi yerine getirir. Bir diğer deyişle, açık siciller, klas kuruluşlarına yeni bir hayat vermiştir (Piniella ve ark., 2017).

Broker Firmaları (K8): Gemi broker firmaları, gemi alıcıları ve satıcıları arasında aracı olarak hareket etmektedir. Bu firmalar, armatörlerle fırsatları ve piyasa eğilimlerini görüşen, satışlar hakkında rapor veren, gemileri değerlendiren, navlun kazançlarını hesaplayan, finans konusunda tavsiyelerde bulunan ve belirli istihdam fırsatları için gemiler bulan firmalardır (Keradinidis ve ark., 2012).

İşletme Giderleri (K9): Bir geminin işletme maliyetleri personel maaşları, ekipman, sigorta, bakım ve onarım, genel giderler şeklinde sıralanmaktadır (Erol, 2016). 1970'lerden beri, kapalı gemi siciline sahip olan ülkeler, yüksek standartlı bir ulusal filoyu korumak için operasyonel maliyetleri düşürürken, açık gemi sicili ülkelerinin bazı politikalarını benimsemiştir ve denizcilik politikalarını gözden geçirerek ikinci gemi sicil sistemini tanıtmıştır. Bu gemi sicili, denizcilik endüstrilerini canlandırmayı amaçlayan bir kurumsal değişim biçimidir. İkinci gemi sicili, gemi sahipleri için iyi bir

işletme ortamı yaratmıştır ve operasyonel maliyetleri düşürmüştür. Bu ekonomik çekicilik ikinci gemi sicil sistemini birçok armatör için ilk tercih haline getirmiştir ve böylece ülkenin uluslararası denizcilik sektöründeki statüsünü ve etkisini artırmıştır. Ek olarak, vergi politikaları ve finansman koşulları armatörler için önemli ekonomik faydalar sağlamış, operasyonel maliyetleri düşürmüş ve pazar rekabet gücünü artırmıştır (Chen ve ark., 2024).

Vergilendirme ve Filo İndirimi (K10): Açık gemi sicillerinin denizcilik şirketlerine vergi muafiyeti sunduğu bilinmektedir. Gemi sahipleri bu sicile sahip bayraklara gemilerinin kaydettirerek vergi avantajından yararlanmaktadır. Bu durum, ülkelerinde kayıtlı olan gemilerini açık gemi sicil bayraklarına transferlerini engellemek isteyen denizci ülkeleri benzer vergilendirme süreçleri için teşvik etmiştir. Ancak gemi sahipleri için açık gemi sicillerine sahip olan ülkeler, yüksek vergilendirme ve katı kuralların olmadığı bir liman haline gelmiştir. Günümüzde en büyük açık gemi sicillerine sahip olan Panama, Marshall Adaları ve Liberya, yabancı denizcilik şirketlerine vergi indirimi sağlamaktadır (Merk, 2020).

Politik Sebepler (K11): Bazı armatörler, kendi devletlerini etkileyen politik veya ekonomik nitelikteki engelleri veya kısıtlamaları aşmak için yabancı bayraklar altında kayıt yaptırmaktadır. Açık gemi sicili gemi sahipleri tarafından tarihsel olarak genellikle ekonomik, politik veya güvenlikle ilgili çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. 1930'larda, Avrupa'daki kötüleşen politik durum, açık sicillere geçiş için önemli bir ivme sağlamıştır ve birçok Avrupalı armatör bu yüzden Panama bayrağına geçmiştir. II. Dünya Savaşı'ndan sonra, Panama'nın politik istikrarı konusundaki belirsizlik ve yüksek konsolosluk ücretlerinden duyulan memnuniyetsizlik, Liberya denizcilik otoritesi adında bir açık gemi sicili kurulmuştur ve 1948'de Liberya Denizcilik Yasası'nın taslağının hazırlanmasıyla Liberya, gemi sicili New York'ta bulunan ve onu cazip bir ABD seçeneği haline getiren açık sicilli bir devlet olmuştur (Rogers, 2010). Özet olarak savaşlar, devrimler, darbeler, düşmanlıklar, yabancı varlıkların siyasi millileştirilmesi ve grevler gibi politik olayların hepsinin denizcilik talebi üzerinde dolaylı bir etkisi olmaktadır (Okpara, 2020).

Bayrak Çekme Yasal Süreçleri (K12): Bayrak çekme süreçlerinde en çok tercih edilen sicil, açık gemi sicilidir. Yabancı bir şirket veya yabancılar tarafından yönetilen bir geminin açık gemi siciline kaydolması çok kolaydır. Ayrıca açık gemi sicilinin, gemi sahiplerinin kendi ülkelerindeki mali yükümlülüklerden kaçınma amacıyla tercih ettiği bilinmektedir. Küresel pazarda açık gemi sicili ülkelerinde kayıt işlemleri 24 saat içerisinde yapılmaktadır. Bu da bayrak çekme için büyük bir tercih sebebidir (Mitroussi & Arghyrou, 2016). Panama Denizcilik Otoritesinin dünya çapında 64'ten fazla denizcilik konsoloslugu ve 9 teknik ofisinin olmasından dolayı bayrak çekme süreci en fazla 4 saatte tamamlanmaktadır. Buna karşın kapalı gemi siciline sahip olan Pakistan'ı örnek vermek gerekirse, gemi kayıt işlemleri uzun ve karmaşık bir süreç olarak görülmektedir (Ali Shah & Kanwar Muhammad, 2021).

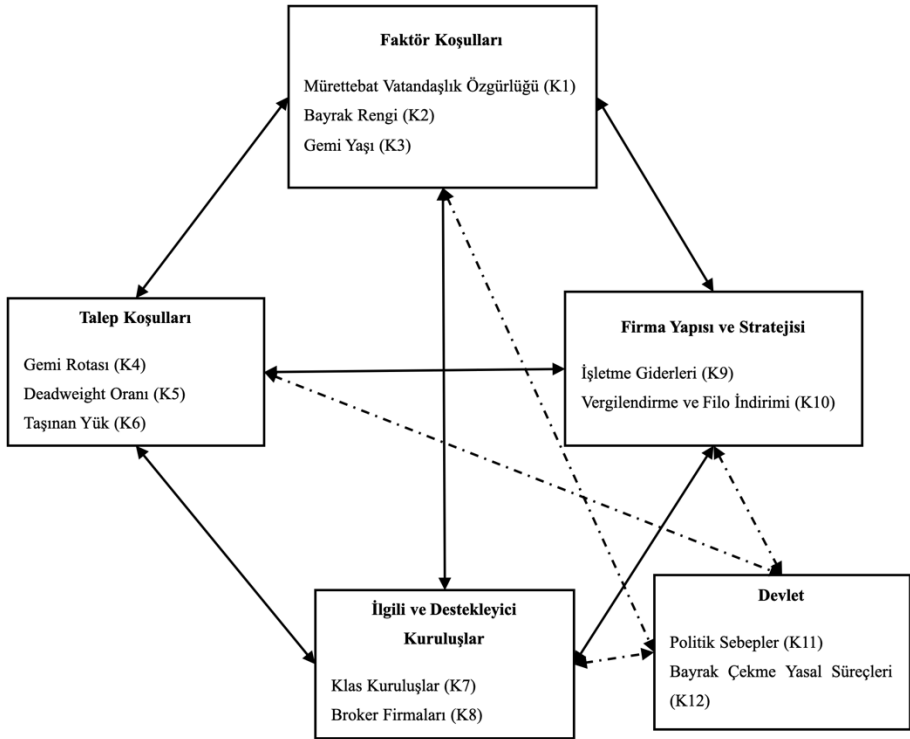
İlgili kriterler Porter Elmas Modelindeki ana kriterlere göre gruplandırılmıştır. **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de bayrak seçim kriterleri Elmas Modelinin Ana kriterleri altında belirlenmiş, tanımlaması yapılmış ve referansları belirtilmiştir.

Tablo 1. Bayrak Seçim Kriterleri

| Kriter | Alt Kriter | Tanım | Referans |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|--|
| Faktör Koşulları | Mürettebat Vatandaşlık Özgürlüğü | Gemilerde çalışan mürettebatın bayrak devleti harici başka bir ülkeden istihdam edilmesi. | (Silos ve ark., 2011) |
| | Bayrak Rengi | Paris MOU tarafından her sene yayınlanan performans listesinde belirlenen rengin önemi. | (Paris MOU, 2024) |
| | Gemi Yaşı | Gemi yaşı bir geminin denize ilk indiği tarihten itibaren geçen süreyi ifade eder. | (Cariou & Wolff, 2011) (Galley, 2013) (Hoffmann ve ark., 2005) |
| Talep Koşulları | Gemi Rotası | Geminin yükünü yüklediği ve boşalttığı limanlara ulaşmak için izlediği güzergahtır. | (Bergantino & Marlow, 2006) |
| | Deadweight Oranı | Bayrak devletinin dünya gemi filosundaki deadweight oranı. | (UNCTAD, 2023) |
| | Taşınan Yük | Geminin taşıyacağı yüke bağlı olarak kiracının talebi doğrultusunda seçim yapılması. | (Haider, 2013) |
| İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar | Klas Kuruluşlar | Belirli aralıklarda yapılan denetimleri gerçekleştirecek survey veya klas kuruluşların ilgili bayrakta yetkili olması. | (Piniella ve ark., 2017) |
| | Broker Firmaları | Broker, bir tarafta yükün sahipleri ve yükün gönderilenleri, diğer tarafta gemi sahipleri veya işleticileri arasında aracı olarak hareket eden kişi veya kuruluşlara denir. | (Alcaidea ve ark., 2016) (Cakmak, 2024) |
| Firma Yapısı ve Stratejisi | İşletme Giderleri | İşletme giderleri arasında yer alan onarım, bakım vb giderlerin göz önüne alınması. | (Bergantino & Marlow, 2006) |
| | Vergilendirme ve Filo İndirimi | Bayrakların net ve brüt tonaj hesaplamasına göre yapmış olduğu yıllık vergi ödemesi ve birden fazla gemiyle bayrağa sicil kaydı yaptırarak yıllık oranında vergi indiriminden yararlanma fırsatı. | (Merk, 2020) (Marlow & Mitroussi, 2011) (Haotian, 2013) |

| | | | |
|--------|------------------------------|---|---|
| Devlet | Politik Sebepler | Bayrak devletinin siyasi istikrara sahip olması ve dünya ticaretinde tanınırlığının olması. | (Rogers, 2010) (Shaheen, 2018) (Okpara, 2020) |
| | Bayrak Çekme Yasal Süreçleri | Bayrak çekme işleminin hızlı olması ve daha az dökümantasyonla sürecin tamamlanması. | (Mitroussi & Arghyrou, 2016) |

Belirlenen kriterler doğrultusunda Şekil 3'te Bayrak Seçim Elmas Modeli oluşturulmuştur.



Şekil 3. Bayrak Seçim Elmas Modeli

3.3. Alternatiflerin Belirlenmesi

(Balık, 2023) yaptığı çalışmasında sahipliğin Türk olduğu gemilerin % 38,7' sinin ulusal bayrak tercih ederken geri kalanının yabancı bayrak taşıdığını belirtmektedir. Yabancı bayrak taşıyan gemilerin seçtiği ülkeler Türkiye'nin rekabet içinde olduğu bayrak sicilleri olarak değerlendirilmiş ve aşağıda belirlenen ülkeler tanıtılmıştır.

Barbados Denizcilik İdaresi (A1): 1994 yılında kurulan Barbados Denizcilik İdaresi, 2023 yılı itibariyle 272 gemiye sahiptir. Bu gemilerin 90'ı dökme yük gemisi, 149'u

genel kargo, 5'i tanker ve geri kalan 28 gemi ise diğer gemi türlerinde yer almaktadır (Central Intelligence Agency [CIA] - The World Fact Book, 2024). Barbados bayrağı Temmuz 2024-Temmuz 2025 arası geçerli olan Paris MOU bayrak performansı listesinde beyaz bayrak olarak nitelendirilmiştir (Paris MOU, 2024).

İtalya Uluslararası Gemi Sicil İdaresi (A2): İtalyan Uluslararası Gemi Sicili, 30 Aralık 1997 tarihinde kurulmuş olup, 27 Şubat 1998 tarihinde bazı değişikliklerle düzenlenmiştir. Bu sicil, üç bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm, Avrupa Birliği (AB) ve İtalyan şirketlerine veya bireylerine ait gemilerle ilgili olurken, ikinci bölüm, bir AB veya İtalyan şirketi veya bireyi tarafından devralınan AB dışı ülkelerde kayıtlı gemilerle ilgilidir. Üçüncü bölüm ise bir İtalyan gemi kiralayan yüzünden AB üyesi olmayan bir ülke tarafından geçici olarak askıya alınmış olan AB dışındaki vatandaşlar ve şirketler tarafından işletilen gemiler için oluşturulmuştur (Lauro ve ark., 2020). 2024 yılındaki UNCTAD raporuna göre İtalya bayrağı 1240 gemiye sahiptir ve an itibariyle Paris MOU tarafından beyaz bayrak olarak nitelendirilmektedir (UNCTAD, 2024).

Liberya Denizcilik İdaresi (A3): 1948 yılında kurulan Liberya Denizcilik İdaresi, (UNCTAD, 2024) raporuna göre Liberya, 5215 gemi, 408.369 DWT tonuyla dünyadaki en büyük filoya sahiptir. Açık gemi siciline sahip olan Liberya, Paris MOU tarafından beyaz bayrak olarak nitelendirilmiştir. Liberya, an itibariyle dünyadaki gemi filosunun %16'sına sahiptir (Liberian Registry History, 2024).

Malta Denizcilik İdaresi (A4): 1973 yılında yürürlüğe giren Malta Denizcilik Yasası ile kurulan Malta Denizcilik İdaresi, 2024 yılı itibariyle 1867 gemisiyle Avrupa'nın en büyük gemi filosuna sahiptir. Paris MOU tarafından beyaz bayrak olarak görülmektedir (UNCTAD, 2024).

Marshall Adaları Denizcilik İdaresi (A5): 1948 yılında kurulan Marshall Adaları Denizcilik İdaresi, Eylül 2024 itibariyle 5772 gemisiyle 201,987,707 brüt tonaja sahiptir. Bu gemilerin 1953'ü dökme yük gemisi, 1331'i tanker, 276'sı genel kargo gemisidir. Paris MOU tarafından beyaz bayrak olarak nitelendirilen Marshall Adaları bayrağı, açık gemi siciline sahiptir (International Registries, 2024).

Panama Denizcilik İdaresi (A6): 1917 yılında kurulan Panama Denizcilik İdaresi, (UNCTAD, 2024) raporuna göre 8338 gemiye sahiptir. 379.833 DWT tona sahip olan Panama Denizcilik İdaresi, Haziran 2023 tarihinde yayımlanan Paris MOU bayrak performans listesinde beyaz bayraktan gri bayrağa düşmüştür (Paris MOU, 2023). Panama Denizcilik İdaresi, gri bayrağa düşmesinin sebebini yaşlı gemiler ve yoğun yaşanan tutuklanmalar olduğunu bildirmiştir (Panama Maritime Authority, 2023).

Rusya Denizcilik İdaresi (A7): 1913 yılında kurulan Rusya Denizcilik İdaresi, 2024 yılı itibariyle 2902 gemiye sahiptir. Kapalı bir sicil olarak kurulmuş olan sicil, 2006 yılında ikinci sicil uygulamasıyla yabancı gemilere de Rusya bayrağı çekme imkânı tanımıştır (UNCTAD, 2024), (Yuanyuan, 2021).

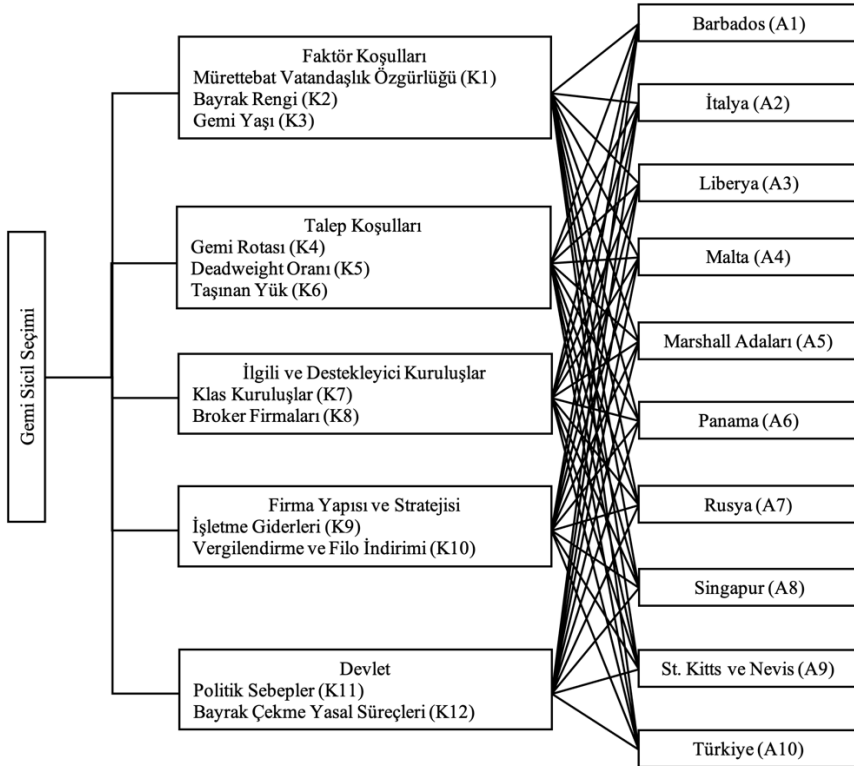
Singapur Denizcilik İdaresi (A8): 1966 yılında kurulmuş olan Singapur Denizcilik İdaresi, 2024 yılı itibariyle 3245 gemiye sahiptir. 141.013 DWT ton verisi dünyadaki filoların %6'sına denk gelmektedir (UNCTAD, 2024). Paris MOU'nun bayrak performans listesinde 4. Sırada yer alan Singapur, UNCTAD'a göre açık gemi sicili

olarak görülürken, Uluslararası Taşımacılık İşçileri Federasyonu tarafından yayımlanan açık gemi sicili listesinde bulunmamaktadır (International Transport Workers' Federation , 2024), (UNCTAD, 2023).

St. Kitts ve Nevis Denizcilik İdaresi (A9): 2005 yılında kurulan St. Kitts ve Nevis Denizcilik İdaresi, 2023 yılı itibarıyla 341 gemiye sahiptir. Bu gemilerin 22'si dökme yük gemisi, 16'si konteynır gemisi, 85'i genel kargo, 59'u tanker ve geri kalan 159 gemi ise diğer gemi türlerinde yer almaktadır (CIA - The World Fact Book, 2024). Barbados bayrağı Temmuz 2024-Temmuz 2025 arası geçerli olan Paris MOU bayrak performansı listesinde gri bayrak olarak nitelendirilmiştir (Paris MOU, 2024).

Türkiye Denizcilik İdaresi (A10): 1956 yılında kurulan Türk Milli Sicili, Türk bayrağı çekmek isteyen kişiler için oluşturulmuştur. Yabancı kişiler için düzenlenmiş olarak Türk Uluslararası Gemi Sicili ise 1999 yılında yürürlüğe girmiştir (Güzel, 2012). 2024 yılı itibarıyla dünyada 1203 Türk bayraklı gemi bulunurken, toplamda 7.230 DWT tona sahip olan bu gemilerin dünya filosuna katkısı 0.3 olarak ölçülmüştür (UNCTAD, 2024). Türkiye, Paris MOU'nun yayımladığı listede beyaz bayrak olarak nitelendirilmektedir.

Belirlenen bu kriterler ve alternatifler sonucunda bayrak seçiminin hiyerarşik çerçevesi **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** de belirtilmiştir.



Şekil 4. Bayrak Seçim Problemi Hiyerarşik Çerçevesi

3.4. SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis- Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi) Yöntemi

(Gürler, 2024)'e göre SWARA yöntemi, uzman görüşlerini dikkate alarak her bir kriterin göreceli önemini belirleme tekniğidir. Bu teknikte uzmanlar kriterlere azalan önemlerine göre ağırlık değerleri atarlar. Kriterlerin önemini belirlemek için çiftler halinde karşılaştırma matrisi oluşturulur ve öncelik ağırlıkları belirlenir. SWARA, diğer Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerine göre daha kolay ve daha rahat yapılabilir bir yöntemdir. SWARA'nın kararı, uzmanın bilgi ve deneyimine dayanır. Bu yöntem, bir niteliğin diğer niteliklerden daha yüksek veya daha düşük öneme sahip olduğu gerçeğini dikkate almaktadır (Prajapati ve ark., 2019). SWARA yöntemi, karar vermede niteliklerin önem oranını bulur (Keršulienė ve ark., 2010), kriterin göreceli ağırlıklarını bulmak için aşağıdaki 5 adım uygulanmaktadır:

Adım 1: Uzman, kriterleri önem sırasına göre büyükten küçüğe doğru belirler.

Adım 2: Uzman, ikinci kriterden başlayarak kriter j 'nin bir önceki kriter $j-1$ 'e göre ne kadar önemli olduğuna karar verir. Bu göreceli önem orantılı olarak hesaplanır ve s_j ile gösterilir.

Adım 3: Aşağıdaki denklemi kullanarak katsayı k_j 'yi hesaplanır:

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Adım 4: Aşağıdaki denklemi kullanarak yeniden değerlendirilen ağırlık q_j 'yi hesaplanır:

$$q_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{k_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Adım 5: Her değerlendirme kriterinin göreceli önemi aşağıdaki formülle belirlenir:

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k}, \quad (3)$$

n toplam kriter sayısıdır ve j kriterinin ağırlığı w_j ile gösterilir.

3.5. COPRAS (Complex Proportional Assessment) Yöntemi

Zavadskas ve Kaklauskas 1996 yılında geliştirilen COPRAS yöntemi, çatışan kriterlerin varlığında mevcut alternatiflerin önem ve fayda derecelerine odaklanır. Alternatiflerin farklı kriterlere ve ilgili kriter ağırlıklarına göre performansını dikkate alır. Bu yöntem hem fayda hem de zarar kriterlerini dikkate alır ve en iyi alternatifini seçer (Zavadskas & Kaklauskas, 1996).

COPRAS yöntemi, diğer Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden farklı olarak, alternatifleri karşılaştırırken her bir alternatifin diğerlerinden ne kadar iyi veya kötü

olduğunu yüzde olarak belirler. COPRAS yönteminin avantajları arasında, çözüm adımlarının kısa ve kolay olması, özel bir bilgisayar yazılımı gerektirmemesi sayılabilir. Bu yöntem, farklı çözüm yolları dikkate alınarak farklı sayıda adımdan oluşsa da genellikle altı adımda hesaplanır (Arsu, 2022). Aşağıda COPRAS yönteminin aşamaları detaylandırılarak belirtilmiştir (Organ & Yalçın, 2016).

Adım 1: Karar Matrisinin Oluşturulması

Tüm çok kriterli karar verme problemlerinde olduğu gibi öncelikle karar matrisi oluşturulur. Karar matrisi şu şekildedir:

$$D = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \chi_{13} & \cdot & \chi_{1n} \\ \chi_{21} & \chi_{22} & \chi_{23} & \cdot & \chi_{2n} \\ \chi_{31} & \chi_{32} & \chi_{33} & \cdot & \chi_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \chi_{m1} & \chi_{m2} & \chi_{m3} & \cdot & \chi_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Karar Alma Matrisinin Normalizasyonu

Dikkat edilen alternatiflerin performanslarını karşılaştırılabilir boyutsuz değerlere dönüştürmek için normalizasyon prosedürü kullanılır. COPRAS yönteminde normalizasyon için aşağıdaki formül kullanılır:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

Adım 3: Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi Belirleme

Normalize edilmiş karar alma matrisi oluşturulduktan sonraki aşama, aşağıdaki formül kullanılarak ağırlıklı normalize edilmiş karar alma matrisinin oluşturulmasıdır:

$$D' = d_{ij} = x_{ij} * .w_j \quad (3)$$

Adım 4: Her Alternatif için Maksimize ve Minimize Etme Endeksinin Hesaplanması
Bu aşamada her alternatif, maksimize ve minimize etme endeksi olarak kategorize edilir:

$$S_{i+} = \sum_{j=1}^k d_{ij} \quad j=1,2,\dots,k \text{ maksimizasyon endeksi} \quad (4)$$

$$S_{i-} = \sum_{j=k+1}^n d_{ij} \quad j=k+1, k+2,\dots, n \text{ minimize etme endeksi} \quad (5)$$

Adım 5: Her Alternatifin Göreceli Ağırlıklarının Hesaplanması

i. alternatifin ağırlığı Q_i aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\min_i S_{-i} \sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m \frac{\min_i S_{-i}}{S_{-i}}} \quad (6)$$

Adım 6: Alternatiflerin Öncelik Sırasını Belirlenmesi

Karşılaştırılan alternatiflerin öncelik sırası, göreceli ağırlıklarına göre belirlenir. Daha yüksek göreceli ağırlığa sahip alternatif daha yüksek önceliğe (sıralamaya) sahiptir ve en yüksek göreceli ağırlığa sahip alternatif, en kabul edilebilir alternatiftir.

$$A^* = \{A_i \mid \max_i Q_i\} \quad (7)$$

Adım 7: Her Alternatif İçin Performans Endeksi (P_i) Değerinin Hesaplanması
Son bölümde, P_i değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır:

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \cdot 100 \% \quad (8)$$

100 dereceye sahip olan alternatif alternatiflerin en iyisidir. Alternatiflerin sıralaması büyükten küçüğe doğru yapılır.

4. UYGULAMA

Bu çalışmada, bayrak çekmede tercih edilen ve Türkiye'nin de dahil olduğu ülke sicillerinin rekabetçiliği bütünlük SWARA ve COPRAS yöntemleri ile değerlendirilerek, ülkelerin rekabetçiliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak SWARA ile kriter ağırlıkları bulunmuş ardından COPRAS yöntemi kullanılarak bayrak seçiminde alternatif 10 ülkenin değerlendirmesi yapılmıştır.

4.1. Kriterlerin SWARA ile Ağırlıklandırılması

Bu aşamada Bölüm 3.3'te belirtilen adımlar takip edilmiştir. Adım 1'de Tablo 1'de özellikleri belirtilen ve firmalarında bayrak sicil seçimi yapan 7 karar vericiye kriterlerin en önemliden en az önemliye göre sıralaması istenmiştir. Adım 2'de Karar vericiler (KV) her kriterin kendisinden bir sonraki kritere göre görece olarak ne düzeyde önemli olduğunu (Ortalama değer karşılaştırmalı önemi (s_j)) belirlemişlerdir. Karar vericilerin kriter sıralamaları ve s_j değerleri Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 1. KV'lerin Özellikleri

| | Eğitim Durumu | Çalışma Süresi | Firmadaki Görevi |
|-----|---------------|----------------|--|
| KV1 | Lisans | 16-20 yıl | Karada Görevli Kişi (DPA) |
| KV2 | Lisans | 11-15 yıl | Finans Sorumlusu |
| KV3 | Lisans | 16-20 yıl | Karada Görevli Kişi (DPA) |
| KV4 | Lisans | 6-10 yıl | Karada Görevli Kişi (DPA) |
| KV5 | Lisans | 11-15 yıl | Karada Görevli Kişi (DPA) |
| KV6 | Lisans | 21+ yıl | Karada Görevli Kişi (DPA) |
| KV7 | Doktora | 11-15 yıl | Şirket Güvenlik Zabiti, Teknik Enspektör |

ISM Koduna göre (International Safety Management Code), Karada Görevli Kişi (DPA), Güvenlik Yönetim Sisteminin etkili bir şekilde uygulanmasında önemli bir rol oynar ve tüm güvenlik ve kirlilik önleme faaliyetlerinin doğrulanması ve izlenmesinden sorumludur (International Maritime Organization [IMO], 2014)

Tablo 2. Kriterlerin KV'ler Düzeyinde Karşılaştırmalı Önemi

| Önem Sırası | KV1 | | KV2 | | KV3 | | KV4 | | KV5 | | KV6 | | KV7 | |
|-------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | Kriter | s_j | Kriter | s_j | Kriter | s_j | Kriter | s_j | Kriter | s_j | Kriter | s_j | Kriter | s_j |
| 1 | K9 | | K10 | | K2 | | K11 | | K2 | | K9 | | K11 | |
| 2 | K10 | 0,50 | K1 | 0,10 | K11 | 0,50 | K12 | 0,80 | K3 | 0,30 | K10 | 0,50 | K2 | 0,30 |
| 3 | K11 | 0,50 | K9 | 0,10 | K1 | 0,40 | K2 | 0,50 | K1 | 0,50 | K12 | 0,60 | K12 | 0,60 |
| 4 | K2 | 0,25 | K2 | 0,25 | K9 | 0,40 | K3 | 1,00 | K7 | 0,30 | K3 | 1,00 | K10 | 0,10 |
| 5 | K7 | 0,25 | K6 | 0,10 | K7 | 0,60 | K1 | 0,25 | K11 | 0,20 | K4 | 0,60 | K7 | 0,50 |
| 6 | K1 | 0,50 | K7 | 0,10 | K10 | 0,45 | K7 | 0,60 | K10 | 0,50 | K1 | 0,50 | K5 | 0,60 |
| 7 | K12 | 0,50 | K8 | 0,05 | K12 | 0,35 | K8 | 0,50 | K9 | 0,10 | K5 | 1,00 | K1 | 0,05 |
| 8 | K6 | 0,50 | K3 | 0,05 | K8 | 0,55 | K6 | 0,80 | K12 | 0,50 | K7 | 0,40 | K9 | 0,40 |
| 9 | K3 | 0,50 | K4 | 0,15 | K5 | 0,30 | K10 | 0,25 | K4 | 0,70 | K11 | 0,70 | K3 | 0,50 |
| 10 | K8 | 0,25 | K11 | 0,05 | K6 | 0,20 | K9 | 0,50 | K8 | 0,10 | K6 | 0,40 | K8 | 0,80 |
| 11 | K5 | 0,50 | K12 | 0,10 | K3 | 0,25 | K5 | 0,50 | K6 | 0,20 | K8 | 0,30 | K6 | 0,50 |
| 12 | K4 | 0,50 | K5 | 0,05 | K4 | 0,30 | K4 | 0,25 | K5 | 0,10 | K2 | 0,30 | K4 | 0,40 |

Adım 3, 4 ve 5'teki formüller kullanılarak katsayı (k_j) değerlerine ulaşılmıştır. Her kritere için önem vektör (q_j) değerleri ve kriterlere ait ağırlıklar (w_j) hesaplanmıştır. KV1'e ait k_j , q_j ve w_j değerleri Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. KV1 Kriter Ağırlıkları Hesaplama

| Kriter | Önem Sırası | s_j | k_j | q_j | w_j |
|--------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| K9 | 1 | | 1,00 | 1,00 | 0,303 |
| K10 | 2 | 0,50 | 1,50 | 0,67 | 0,202 |
| K11 | 3 | 0,50 | 1,50 | 0,44 | 0,135 |
| K2 | 4 | 0,25 | 1,25 | 0,36 | 0,108 |
| K7 | 5 | 0,25 | 1,25 | 0,28 | 0,086 |
| K1 | 6 | 0,50 | 1,50 | 0,19 | 0,057 |
| K12 | 7 | 0,50 | 1,50 | 0,13 | 0,038 |
| K6 | 8 | 0,50 | 1,50 | 0,08 | 0,026 |
| K3 | 9 | 0,50 | 1,50 | 0,06 | 0,017 |
| K8 | 10 | 0,25 | 1,25 | 0,04 | 0,014 |
| K5 | 11 | 0,50 | 1,50 | 0,03 | 0,009 |
| K4 | 12 | 0,50 | 1,50 | 0,02 | 0,006 |

KV 1 için yapılan hesaplamalar diğer KV'ler için de yapılmış ve kriter ağırlıkları **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilmiştir.

Tablo 5. KV Kriter Ağırlıkları

| | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| K1 | 0,057 | 0,128 | 0,150 | 0,059 | 0,134 | 0,033 | 0,048 |
| K2 | 0,108 | 0,093 | 0,314 | 0,147 | 0,262 | 0,003 | 0,211 |
| K3 | 0,017 | 0,070 | 0,011 | 0,074 | 0,201 | 0,079 | 0,023 |
| K4 | 0,006 | 0,060 | 0,009 | 0,004 | 0,020 | 0,049 | 0,006 |
| K5 | 0,009 | 0,050 | 0,017 | 0,005 | 0,014 | 0,016 | 0,050 |
| K6 | 0,026 | 0,084 | 0,014 | 0,014 | 0,016 | 0,005 | 0,008 |
| K7 | 0,086 | 0,077 | 0,067 | 0,037 | 0,103 | 0,012 | 0,080 |
| K8 | 0,014 | 0,073 | 0,022 | 0,025 | 0,019 | 0,004 | 0,013 |
| K9 | 0,303 | 0,116 | 0,107 | 0,007 | 0,052 | 0,380 | 0,034 |
| K10 | 0,202 | 0,140 | 0,046 | 0,011 | 0,057 | 0,253 | 0,120 |
| K11 | 0,135 | 0,058 | 0,209 | 0,398 | 0,086 | 0,007 | 0,275 |
| K12 | 0,038 | 0,052 | 0,034 | 0,221 | 0,035 | 0,158 | 0,132 |

KV'lerin kriter ağırlıklarının ortalamasıyla bulunan kriter ağırlıkları **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**' da belirtilmiştir. KV'lerin değerlendirmelerine göre en önemli ana kriter % 34,98 ile Faktör Koşulları olurken alt kriterlerde Devlet ana kriterinin içinde yer alan Politik Sebepler (K11) %19,50 ile birinci sırada yer almıştır.

Tablo 6. Kriter Ağırlıkları

| Kriter | Alt Kriter | Kriter Ağırlığı | |
|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------|--------|
| Faktör Koşulları | Mürettebat Vatandaşlık Özgürlüğü (K1) | %8,47 | %34,98 |
| | Bayrak Rengi (K2) | %18,75 | |
| | Gemi Yaşı (K3) | %7,76 | |
| Talep Koşulları | Gemi Rotası (K4) | %1,77 | %4,95 |
| | Deadweight Oranı (K5) | %2,05 | |
| | Taşınan Yük (K6) | %1,13 | |
| İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar | Klas Kuruluşlar (K7) | %5,97 | %7,60 |
| | Broker Firmaları (K8) | %1,63 | |
| Firma Yapısı ve Stratejisi | İşletme Giderleri (K9) | %11,61 | %21,37 |
| | Vergilendirme ve Filo İndirimi (K10) | %9,76 | |
| Devlet | Politik Sebepler (K11) | %19,50 | %31,10 |
| | Bayrak Çekme Yasal Süreçleri (K12) | %11,60 | |

4.2. Türkiye'nin Bayrak Sicil Seçiminde Rekabet İçerisinde Olduğu Ülkelerin COPRAS Yöntemi ile Değerlendirilmesi Aşaması

Bu aşamadan sonra Bölüm 3.4.'de belirtilen adımlar takip edilmiştir. Adım 1'de KV'lere bayrak sicil seçimine Türkiye'nin de içinde yer aldığı bayrak sicil seçiminde Türkiye'nin rekabet içerisinde olduğu toplamda 10 ülkenin 12 farklı kritere göre ne derece iyi olduklarını 1 ile 5 arasında (1 en az 5 en çok olacak şekilde) bir değerlendirme yapmaları istenmiştir. KV'lerin ilgili değerlendirmeleri Tablo 3'da verilmiştir.

Tablo 3. KV'lerin Alternatif Ülkeleri Değerlendirmesi

| | K1 | | | | | | | K2 | | | | | | | K3 | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 |
| A1 | 2 | 4 | 3 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 5 | 2 | 5 | 4 | 1 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 |
| A2 | 5 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 | 1 | 4 | 3 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| A3 | 3 | 3 | 4 | 5 | 2 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 5 | 3 |
| A4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 2 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| A5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 2 | 3 |
| A6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 2 |
| A7 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| A8 | 4 | 4 | 5 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| A9 | 3 | 4 | 1 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 | 1 | 5 | 2 | 5 | 1 |
| A10 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 5 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 2 | 2 | 3 |
| | K4 | | | | | | | K5 | | | | | | | K6 | | | | | | |
| | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 |
| A1 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 3 | 5 | 1 |
| A2 | 5 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 5 | 3 | 4 | 5 | 2 | 5 | 1 |
| A3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| A4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 2 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| A5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| A6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 |
| A7 | 3 | 1 | 3 | 5 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| A8 | 4 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 1 | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 |
| A9 | 4 | 5 | 1 | 5 | 2 | 5 | 1 | 3 | 4 | 1 | 5 | 3 | 3 | 1 | 4 | 4 | 1 | 5 | 2 | 2 | 1 |
| A10 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 5 | 1 | 4 | 3 | 4 | 5 | 2 | 3 | 1 | 5 | 4 | 4 | 4 | 2 | 5 | 1 |
| | K7 | | | | | | | K8 | | | | | | | K9 | | | | | | |
| | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 |
| A1 | 2 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 1 | 3 | 4 | 2 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 4 | 1 | 5 |
| A2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 2 | 4 | 5 |
| A3 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| A4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 |
| A5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| A6 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 5 | 1 | 3 |
| A7 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| A8 | 5 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 3 | 5 |
| A9 | 2 | 4 | 1 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 1 | 2 | 5 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A10 | 3 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 2 | 5 | 1 | 2 | 3 | 2 | 4 | 5 | 4 | 5 |

| | K10 | | | | | | | K11 | | | | | | | K12 | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 | KV5 | KV6 | KV7 |
| A1 | 3 | 5 | 3 | 4 | 1 | 4 | 1 | 3 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 1 | 4 | 5 | 3 | 3 | 1 | 5 | 1 |
| A2 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 | 5 | 1 | 4 | 2 | 5 | 3 | 4 | 2 | 1 |
| A3 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 1 | 5 | 3 | 5 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 5 | 4 |
| A4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 2 | 4 | 2 | 5 | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 3 | 5 | 2 |
| A5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 2 | 5 | 5 |
| A6 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 3 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 2 | 4 | 5 | 5 | 5 | 1 | 5 | 3 |
| A7 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| A8 | 3 | 3 | 5 | 4 | 2 | 2 | 1 | 5 | 3 | 5 | 2 | 4 | 5 | 1 | 4 | 3 | 5 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| A9 | 4 | 4 | 1 | 4 | 3 | 5 | 1 | 3 | 5 | 1 | 2 | 4 | 3 | 1 | 4 | 5 | 1 | 3 | 4 | 5 | 1 |
| A10 | 3 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 2 | 5 | 1 | 5 | 3 | 4 | 3 | 1 | 2 | 1 |

Tablo 3’deki KV’lerin değerlendirmelerinin ortalaması alınarak Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 4. Alternatif Ülke Seçimi İçin Kriterlerin Değerleri

| Min/ Maks | Ağırlıklar (SWARA) | Kriterler | Alternatif Ülkeler | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
| Maks | %8,47 | K1 | 3,57 | 2,43 | 3,86 | 4,14 | 5,00 | 4,71 | 1,71 | 3,57 | 3,43 | 2,14 |
| Maks | %18,75 | K2 | 2,86 | 3,43 | 4,14 | 4,29 | 4,29 | 3,00 | 1,57 | 3,43 | 1,71 | 3,57 |
| Maks | %7,76 | K3 | 3,29 | 2,43 | 3,57 | 3,43 | 3,43 | 4,14 | 2,29 | 3,14 | 3,14 | 3,43 |
| Maks | %1,77 | K4 | 3,57 | 3,57 | 4,00 | 4,14 | 4,14 | 4,29 | 1,71 | 4,00 | 3,29 | 3,43 |
| Maks | %2,05 | K5 | 2,86 | 3,43 | 4,43 | 4,29 | 4,57 | 5,00 | 1,86 | 3,71 | 2,86 | 3,14 |
| Maks | %1,13 | K6 | 3,29 | 3,57 | 4,14 | 4,29 | 4,29 | 4,29 | 2,14 | 3,86 | 2,71 | 3,57 |
| Maks | %5,98 | K7 | 3,57 | 4,43 | 4,71 | 4,86 | 4,71 | 4,57 | 1,29 | 3,86 | 2,57 | 3,86 |
| Maks | %1,63 | K8 | 3,14 | 4,29 | 4,14 | 4,43 | 4,29 | 4,14 | 1,29 | 4,00 | 2,86 | 3,43 |
| Min | %11,61 | K9 | 2,86 | 3,29 | 1,57 | 2,57 | 1,86 | 2,14 | 3,86 | 3,00 | 3,14 | 3,57 |
| Maks | %9,76 | K10 | 3,00 | 2,71 | 3,71 | 3,29 | 4,29 | 4,00 | 1,57 | 2,86 | 3,14 | 2,43 |
| Maks | %19,50 | K11 | 3,14 | 3,57 | 4,00 | 4,43 | 4,43 | 4,29 | 1,00 | 3,57 | 2,71 | 3,00 |
| Maks | %11,60 | K12 | 3,14 | 3,00 | 4,14 | 3,86 | 4,43 | 4,00 | 1,29 | 2,86 | 3,29 | 2,71 |

Adım 2’ye göre Tablo 9’ de karar matrisi normalize edilmiştir.

Tablo 9. Karar Matrisi Normalizasyonu

| Min/ Maks | Ağırlıklar (SWARA) | Kriterler | Alternatif Ülkeler | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
| Max | %8,47 | K1 | 0,10 | 0,07 | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,05 | 0,10 | 0,10 | 0,06 |
| Max | %18,75 | K2 | 0,09 | 0,11 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,09 | 0,05 | 0,11 | 0,05 | 0,11 |
| Max | %7,76 | K3 | 0,10 | 0,08 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,07 | 0,10 | 0,10 | 0,11 |
| Max | %1,77 | K4 | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,12 | 0,05 | 0,11 | 0,09 | 0,09 |
| Max | %2,05 | K5 | 0,08 | 0,09 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,14 | 0,05 | 0,10 | 0,08 | 0,09 |
| Max | %1,13 | K6 | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,06 | 0,11 | 0,08 | 0,10 |
| Max | %5,98 | K7 | 0,09 | 0,12 | 0,12 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,03 | 0,10 | 0,07 | 0,10 |
| Max | %1,63 | K8 | 0,09 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,04 | 0,11 | 0,08 | 0,10 |
| Min | %11,61 | K9 | 0,10 | 0,12 | 0,06 | 0,09 | 0,07 | 0,08 | 0,14 | 0,11 | 0,11 | 0,13 |
| Max | %9,76 | K10 | 0,10 | 0,09 | 0,12 | 0,11 | 0,14 | 0,13 | 0,05 | 0,09 | 0,10 | 0,08 |
| Max | %19,50 | K11 | 0,09 | 0,10 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,03 | 0,10 | 0,08 | 0,09 |
| Max | %11,60 | K12 | 0,10 | 0,09 | 0,13 | 0,12 | 0,14 | 0,12 | 0,04 | 0,09 | 0,10 | 0,08 |

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'deki normalize edilmiş karar matrisi değerleri Adım 3'e göre kriter ağırlıkları ile çarpılmış ve Tablo 5'deki ağırlıklandırılmış karar matrisine ulaşılmıştır.

Tablo 5. Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi

| | Maks | Maks | Maks | Maks | Maks | Maks | Maks | Maks | Min | Maks | Maks | Maks |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | K1 | K2 | K3 | K4 | K5 | K6 | K7 | K8 | K9 | K10 | K11 | K12 |
| A1 | 0,0087 | 0,0166 | 0,0079 | 0,0017 | 0,0016 | 0,0010 | 0,0056 | 0,0014 | 0,0119 | 0,0094 | 0,0179 | 0,0111 |
| A2 | 0,0059 | 0,0199 | 0,0058 | 0,0017 | 0,0019 | 0,0011 | 0,0069 | 0,0019 | 0,0137 | 0,0085 | 0,0204 | 0,0106 |
| A3 | 0,0094 | 0,0241 | 0,0086 | 0,0020 | 0,0025 | 0,0013 | 0,0073 | 0,0019 | 0,0065 | 0,0117 | 0,0228 | 0,0147 |
| A4 | 0,0101 | 0,0249 | 0,0082 | 0,0020 | 0,0024 | 0,0013 | 0,0076 | 0,0020 | 0,0107 | 0,0103 | 0,0253 | 0,0137 |
| A5 | 0,0122 | 0,0249 | 0,0082 | 0,0020 | 0,0026 | 0,0013 | 0,0073 | 0,0019 | 0,0077 | 0,0135 | 0,0253 | 0,0157 |
| A6 | 0,0115 | 0,0174 | 0,0100 | 0,0021 | 0,0028 | 0,0013 | 0,0071 | 0,0019 | 0,0089 | 0,0126 | 0,0245 | 0,0142 |
| A7 | 0,0042 | 0,0091 | 0,0055 | 0,0008 | 0,0011 | 0,0007 | 0,0020 | 0,0006 | 0,0161 | 0,0049 | 0,0057 | 0,0046 |
| A8 | 0,0087 | 0,0199 | 0,0076 | 0,0020 | 0,0021 | 0,0012 | 0,0060 | 0,0018 | 0,0125 | 0,0090 | 0,0204 | 0,0101 |
| A9 | 0,0084 | 0,0100 | 0,0076 | 0,0016 | 0,0016 | 0,0009 | 0,0040 | 0,0013 | 0,0131 | 0,0099 | 0,0155 | 0,0117 |
| A10 | 0,0052 | 0,0207 | 0,0082 | 0,0017 | 0,0018 | 0,0011 | 0,0060 | 0,0016 | 0,0149 | 0,0076 | 0,0171 | 0,0096 |

Adım 4 takip edilerek her alternatif için Tablo 6'de maksimize ve minimize etme endeksi hesaplanmıştır.

Tablo 6. S_{i+} ve S_{i-} Değerleri

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S_{i+} | 0,083 | 0,085 | 0,106 | 0,108 | 0,115 | 0,105 | 0,039 | 0,089 | 0,072 | 0,081 |
| S_{i-} | 0,012 | 0,014 | 0,007 | 0,011 | 0,008 | 0,009 | 0,016 | 0,012 | 0,013 | 0,015 |

Her bir alternatife ait görel önem ağırlığı (Q_i) Adım 5'e göre hesaplanmış ve Tablo 7'te verilmiştir. Tablo 7'e göre, en yüksek görel öneme sahip ülke 0,115 değeriyle "A5-Marshall Adaları" olduğunu görebiliriz.

Tablo 7. Q_i Değerleri

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Q_i | 0,083 | 0,085 | 0,106 | 0,108 | 0,115 | 0,106 | 0,039 | 0,089 | 0,072 | 0,081 |

Adım 6 ve 7 ile her bir alternatif ülkenin performans indeks değerleri hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen veriler Tablo 8'da gösterilmiştir. "A5 – Marshall Adaları" 100 performans indeks değeri ile bayrak sicil ülkelerinde birinci sırada yer alırken, "A10 – Türkiye" 70,3 performans indeks değeri ile sekizinci sırada yer almıştır. "A7 – Rusya" 34,2 performans indeks değeri ile sonuncu olmuştur. Alternatif ülkelerin sıralamaları Tablo 8'da son sırada verilmiştir.

Tablo 8. P_i Değerleri ve Alternatif Ülkelerin Sıralaması

| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 | A9 | A10 |
|----------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| P _i | 72,3 | 73,9 | 92,3 | 93,8 | 100 | 91,6 | 34,2 | 77,3 | 63,0 | 70,3 |
| Sıra | 7 | 6 | 3 | 2 | 1 | 4 | 10 | 5 | 9 | 8 |

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bayrak çekme işlemi, deniz hukukunda gemiler için elzem bir işlem olarak görülmektedir. Bu işlem, armatörlerin işletmekte olduğu gemilerin operasyonu için büyük önem taşımaktadır. Bayrak seçimiyle birlikte gemiler, bir ülkenin siciline kaydolmaktadır ve operasyona başlaması için gerekli adımlardan biri tamamlanmaktadır. Denizci kökenli ülkelerin gemi sicil uygulamalarıyla bir pazar yaratıp rekabet oluşturduğu bilinmektedir. Bu bağlamda ülkelerin rekabetçiliğine göre pazardaki konumları şekillenmektedir. Michael Porter'ın ulusların rekabetçiliğini ölçümlemek için geliştirdiği Elmas Modeli'ne göre bir sektörde bir ülkenin rekabetçilik avantajı Faktör Koşulları, Talep Koşulları, İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar, Firma Yapısı ve Stratejisi ve Devlet koşullarının gelişmişliğine göre belirlenmektedir. Ülkeler kendi denizcilik filolarına dahil ederek sicil verdikleri firmalardan vergi ve kayıt ücreti gibi gelir elde etmektedirler. Bu sebepten ülkelerin bayrak çekmedeki seçim öncelikleri rekabetçilik açısından önem teşkil etmektedir. Ancak bayrak çekmeyle ilişkili literatür incelendiğinde bayrak çekme kriterleriyle alakalı çalışmalar yapılmış olmakla birlikte ulusların rekabetçiliğiyle ilişkilendirilmiş bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada Türkiye'nin bayrak çekmedeki rekabetçilik avantajı incelenmiş ve kriter önceliklerine göre yapması gereken stratejik adımlar değerlendirilmiştir. Araştırmanın sonucunda SWARA yöntemiyle bulunan Elmas Modeli'ndeki ana maddelerden Faktör Koşulları etkisinin %34,98 ile ilk sırada, Devlet etkisinin %31,10 ile ikinci sırada, Firma Yapısı ve Strateji etkisinin %21,37 ile üçüncü sırada, İlgili ve Destekleyici Kuruluşlar etkisinin %7,60 ile dördüncü sırada ve Talep Koşulları etkisinin %4,95 ile beşinci sırada yer aldığı sonucuna varılmıştır. Faktör Koşulları ana başlığında yer alan Bayrak Rengi kriterinin %18,75 ile, Devlet ana başlığında yer alan Politik Sebepler kriterinin %19,50 ile, Bayrak Çekme Yasal Süreçleri kriterinin %11,60 ile, Firma Yapısı ve Stratejisi ana başlığında yer alan İşletme Giderleri kriterinin %11,61 ile belirleyici olduğu görülmüştür. Katılımcılara sunulan on ülkenin COPRAS yöntemiyle değerlendirilmesi sonucunda karar vericilerin en çok tercih ettiği bayraklar sırasıyla Marshall Adaları, Malta, Liberya, Panama, Singapur, İtalya, Barbados, Türkiye, St. Kitts ve Nevis ve Rusya olmuştur. Kriter bazlı olarak Türkiye'nin rekabetçiliğini incelemek gerekirse %19,50 ağırlıkla birinci sırada yer alan Politik Sebepler (K11) kriterinde Türkiye, sekizinci sırada yer alırken, Malta birinci, Marshall Adaları ikinci, Panama üçüncü sıradadır. %18,75 ağırlıkla ikinci sırada yer alan Bayrak Rengi (K2) kriterinde ise Türkiye, dördüncü sırada yer almaktadır. Bu kriterde Malta birinci, Marshall Adaları ikinci, Liberya üçüncü sıradadır. Kriter açıklamasında belirtildiği üzere bayrağın güvenilirliği armatörler için bir geminin uğrak limanlarında tutuklanma riskini azaltmakta, bu da gemi sahibinin tercih önceliği içerisinde yer almaktadır. Nitekim, Türkiye Paris MOU tarafından yıllık olarak yayımlanan performans listesinde en güvenilir renk olan beyaz bayrak statüsündedir, bu da Bayrak Rengi (K2) kriterinde Türkiye'nin sıralamada yukarılarda olmasını açıklamaktadır. %11,61 ağırlık ile üçüncü

sırada yer alan İşletme Giderleri (K9) kriterinde Türkiye, dokuzuncu sırada yer almaktadır. Yaşlı bir filoya sahip olan Türkiye'nin bu alanda iyileştirme yapması önem arz etmektedir. %11,60 ağırlık ile dördüncü sırada yer alan Bayrak Çekme Yasal Süreçleri (K12) kriterinde Türkiye, dokuzuncu sırada yer almaktadır. Türkiye'deki bürokratik süreçler, bayrak çekme işleminde uzun bekleme sürelerine sebep olmaktadır.

Çalışmada karar vericilerin açık gemi sicili bir diğer adıyla elverişli bayrağa sahip olan ülkelerden politik olaylar açısından risksiz ülkeleri tercih ettikleri gözlemlenmiştir. Bayrak çekme işlemlerini daha rahat ve hızlı yaptırabildiği, bayrak rengine bağlı olarak daha iyi performans sergileyen ülkeleri tercih etmektedirler. Öte yandan karar vericilerin gemilerine bayrak seçerken kendi ülkeleri Türkiye'nin ilk tercih ettiği ülkeler arasında yer almadığı görülmektedir. Türkiye'nin sicil kuralları gereği elverişli bayrak olmadığını için zorlu kayıt süreçlerine sahip olması ve vergilendirmesinin maliyetli olması nedeniyle karar vericilerin Türkiye'yi ilk tercihlerinde yer vermediği görülmüştür.

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.

Etik Kurul Onay Beyanı

İstanbul Ticaret Üniversitesi'nin 8.10.2024 tarihli E-65836846-044-334211 numaralı kararıyla Etik Kurul Onayı alınmıştır.

KAYNAKÇA

Akimova, O., Kravchenko, A., & Akimov, V. (2013). Modern scientific research and their practical application. *Kupriyenko SV - Project SWorld*.

Akpan, A. (2016). The Ownership and Nationality of a Ship from a Maritime Cabotage Law Perspective . *Bonomo Editore*.

Alcaidea, J. I., Piniella, F., & Rodríguez-Díaz, E. (2016). The “Mirror Flags”: Ship registration in globalised ship breaking industry. *Transportation Research Part D*, 378-392.

Ali Shah, S. K., & Kanwar Muhammad, J. I. (2021). Improving Ship Register: Traditional Registry Versus Flag Of Convenience. *Journal of Contemporary Issues in Business and Government*.

Anderson, M., & Fitzpatrick, D. (2005). *Seafarers' Rights*. Oxford University Press.

- Arıcan, O. H., & Kara, G. (2023). Kimyasal Tankerlerde CDI Denet Eksikliklerinin Belirlenmesi. *Denizcilik Araştırmaları Dergisi: Amfora*.
- Arsu, T. (2022). Assessment of Macroeconomic Performances and Human Development Levels of BRICS and MINT Countries Using CRITIC and COPRAS Methods. *Pacific Business Review (International) Volume 14*.
- Balık, İ. (2023, Aralık 26). Türkiye'nin Denizcilik Filosunda Yabancı Bayrak Taşıma Oranının Dünya Ölçeğinde Değerlendirilmesi. *Denizcilik ve Lojistik Araştırmaları Dergisi*, s. 82.
- Bergantino, A., & Marlow, P. (2006). Factors influencing the choice of flag: empirical evidence. *Maritime Policy & Management*.
- Bolat, F., & Alpaslan, S. (2021). Cumulative Analysis of Port State Control Based on Paris MoU Inspections. *Transactions on Maritime Science*.
- Bouraima, M. B., Qiu, Y., Stevic, Z., & Simic, V. (2023). Assessment of alternative railway systems for sustainable transportation using an integrated IRN SWARA and IRN CoCoSo model. *Socio-Economic Planning Sciences* 86 .
- Bruce Farthing, M. B. (1997). *Farthing on International Shipping (3rd edition)*. London: LLP.
- Cakmak, O. (2024, Ekim 5). *Gemi Brokeri kimdir?* DARGE: <https://dargeb.com/gemi-brokeri-kimdir/> adresinden alındı
- Cariou, P., & Wolff, F.-C. (2011). Ship-owners' decisions to outsource vessel management. *Laboratoire d'Economie et de Management Nantes-Atlantique Université de Nantes*.
- Carlisle, R. (2009). Second Registers: Maritime Nations Respond to Flags of Convenience, 1984-1998. *The Northern Mariner/Le marin du nord*, 319-340.
- Celik, M., Er, I. D., & Ozok, A. F. (2009). Application of fuzzy extended AHP methodology on shipping registry selection: The case of Turkish maritime industry. *Expert Systems with Applications* 36, 190-198.
- Central Intelligence Agency [CIA] - The World Fact Book*. (2024, Ekim 26). Barbados: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/barbados/> adresinden alındı
- Chen, J., Xu, J., Zhao, Q., Yuan, Z., Li, L., Chen, H., . . . Xiang, Y. (2024). Innovation of the global international ship registry system: Evolution process and future reforms. *Ocean and Coastal Management*.

- Chou, C.-c. (2018). Application of ANP to the selection of shipping registry: The case of Taiwanese maritime industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*.
- Chung, C.-C., & Hwang, C.-C. (2005). Analysis On Vessel Registration And Operational Performance Of Bulk-Shipping Firms . *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 631-646.
- CIA - *The World Fact Book*. (2024, Ekim 26). Saint Kitts and Nevis: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/saint-kitts-and-nevis/> adresinden alındı
- Coles, R., & Watt, E. (1998). *Ship Registration: Law and Practice*. Londra: informa.
- Diallo, F. S. (2021). Porter'ın Elmas Modeli Ve Gine Cumhuriyeti Bağlamında Bir Değerlendirme. Bursa, Türkiye: Uludağ Üniversitesi.
- Erarslan, İ. H., Karataş, A., & Kaya, H. (2007). Türk plastik sektörünün rekabetçilik analizi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 203-219.
- Eren, E. (2013). *Stratejik Yönetim ve İşletme Politikası, 9. Baskı*. Beta Basım Yayım.
- Erkan, C., & Erkan, H. (2004). Bilgi Ekonomisinde Teori ve Politika. *Ekonomi ve Yönetim Kongresi*. Eskişehir.
- Erol, S. (2016). Calculating the Unit Voyage Cost in Maritime Transportation: An Implementation Study. *International Social Science, Humanity and Education Research Congress*. Bali: Eminent Association of Pioneers.
- Fan, J., Yuan, Y., & Wu, M. (2024). Railway Transportation Scheme Selection Based a CODAS- COPRAS Method in Triangular Dense Fuzzy Linguistic Term Lock Environment. *Int. J. Fuzzy Syst.*
- Fan, L., Luo, M., & Yinc, J. (2014). Flag choice and Port State Control inspections— Empirical evidence using a simultaneous model. *Transport Policy*.
- Fossen, A. v. (2016). Flags of Convenience and Global Capitalism. *International Critical Thought*.
- Galley, M. (2013). Flagging interest: ship registration, owner anonymity, and sub-standard shipping. *Mounbatten Journal of Legal Studies*, 87-109.
- Gültekin, S. (2017). Türk Fındığının Uluslararası Rekabet Gücü: M.Porter'ın Diamond (Elmas) Modeline Göre Bir Değerlendirme. *Kesit Akademi Dergisi*, 129-149.

- Gümüş, A., & Bayat, F. (2021). Porter'ın Elmas Modeli Bağlamında Türk Havayolu Taşımacılığının Rekabet Gücü. *Premium E-Journal of Social Sciences*, 196-211.
- Gürler, H. E. (2024). Assessment of Third-Party Reverse Logistics Provider Through the SWARA- WASPAS Integrated Framework. *Kahramanmaraő Sütçü İmam University Journal of Social Sciences 2024 21(1)*, 204-217.
- Güzel, E. B. (2012, Ekim). Türk Uluslararası Gemi Sicili, Milli Gemi Sicili ve Bağlama Kütüğü'nün Birleştirilerek Tek Sicil Altında Toplanması. Türkiye: Ulaştırma Denizcilik ve Haberleőtme Bakanlığı, Deniz Ticareti Genel Müdürlüğü.
- Haider, J. J. (2013). Towards a new era in ship registration. *The International Journal of Logistics Management Vol. 24 No. 1*, 87-100.
- Hamad, H. (2016). The Roles of Flag States in Maritime Security Governance: A Case Study of the East African Community. *University of Greenwich*.
- Haotian, W. (2013). Analysis of ship registration system and study on selection of ship registration system for China. Shanghai, Çin: Shanghai Maritime University.
- Herciu, M. (2013). Measuring international competitiveness of Romania by using porter's diamond and revealed comparative advantage. *Procedia Economics and Finance*, 273-279.
- Hickman, S. (2012). Flagging Options for Seasteading Projects. *The Seasteading Institute*.
- Hızıroğlu, M., & Gümüş, A. (2015). Measuring And Explaining Turkey s Competitiveness in Services Using Balassa Index and Diamond Model. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 195.
- Hoffmann, J., J. Sanchez, R., & K. Tall, W. (2005). Determinants of vessel flag. *Shipping Economics, Research in Transportation Economics, Volume 12,* 173-219.
- Hosanee, N. M. (2009). *A critical analysis of flag state duties as laid down under article 94 of the 1982 united nations convention on the law of the sea*. New York: The United Nations-Nippon Foundation .
- Institute of Shipping Economics and Logistics. (2009). *Shipping statistics and market review*.
- International Maritime Organization [IMO]. (2014). *ISM Code*. Londra: IMO Publication.

- International Maritime Organization [IMO]. (2024, Eylül 28). *Registration of ships and fraudulent registration matters*. IMO: <https://www.imo.org/en/OurWork/Legal/Pages/Registration-of-ships-and-fraudulent-registration-matters.aspx> adresinden alındı
- International Registries*. (2024, Eylül 30). Fleet Stats Through 30 September 2024 : <https://www.register-iri.com/info-center/fleet-highlights/> adresinden alındı
- International Transport Workers' Federation . (2024, Ekim 26). *Current registries listed as FOCs* . ITF Seafarers: <https://www.itfseafarers.org/en/focs/current-registries-listed-as-focs> adresinden alındı
- Kandakoglu, A., Celik, M., & Akgun, I. (2009). A multi-methodological approach for shipping registry selection in maritime transportation industry. *Mathematical and Computer Modelling*.
- Karataş, A., & Şimdi, H. (2019). Has The Turkish International Ship Registry Law Reached Its Goal? *The Journal of Operations Research, Statistics, Econometrics and Management Information Systems*.
- Kaya, A. Y. (2013, Temmuz 31). Türk Donatan İşletmelerinin Klas Kuruluşu Seçimlerinde Karar Verme Süreci Analizi . *Denizcilikte Emniyet, Güvenlik Ve Çevre Yönetimi Programı Yüksek Lisans Tezi*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Kaya, S. K., & Aycin, E. (2021). An integrated interval type 2 fuzzy AHP and COPRAS-G methodologies for supplier selection in the era of Industry 4.0 . *Neural Computing and Applications* .
- Keradinidis, G., Aidonis, D., & Manikas, I. (2012). Maritime Operations and New Business Models Elaboration. *2nd International Conference On Supply Chains*.
- Keršulienė, V., Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2010). Selection Of Rational Dispute Resolution Method By Applying New Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis (Swarra) . *Journal of Business Economics and Management*, 243-258.
- Keser, H. Y. (2011, December 23). Lojistik Sektörünün Rekabet Gücü Yönüyle Analizi: Türk Lojistik Sektörü için Bir Çalışma. Bursa, Türkiye.
- Köseoğlu, B., Töz, A. C., & Şakar, C. (2017). Flag Choice Behavior in the Turkish Merchant Fleet: A Model Proposal with Artificial Neural Network Approach . *Journal of ETA Maritime Science*.

- Lauro, F. S., Ardia, E., Forte, G., & Vernillo, A. (2020). *Law and Practice - Italy*. Studio Legale Lauro: <https://studiolegalelauro.it/wp-content/uploads/2020/03/Chambers-Global-Practice-Guide-Shipping-Law-and-Practice.pdf> adresinden alındı
- Liberian Registry History*. (2024, Ekim 26). Liberian Registry: <https://www.liscr.com/about-us/history> adresinden alındı
- Llacer, F. J. (2003). Open registers: past, present and future. *Pergamon*.
- Marlow, P., & Mitroussi, K. (2011). Shipping taxation: perspectives and impact on flag choice. *International Journal of Shipping and Transport Logistics Vol. 3, No. 4*.
- McKittrick, K. (2015). Diachronic loops/deadweight tonnage/bad made measure. *The cultural geographies Annual Lecture*.
- Mengjie, J., Shib, W., Yuenc, K., Xiao, Y., & Kevin X. Li. (2019). Oil tanker risks on the marine environment: An empirical study and policy implications. *Marine Policy*.
- Merk, O. M. (2020). Quantifying tax subsidies to shipping. *Maritime Economics & Logistics*.
- Mitroussi, K., & Arghyrou, M. G. (2016). Institutional performance and ship registration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*.
- MMC-3, M. M. (2023, Kasım). *Panama Maritime Authority*. <https://panamashipregistry.com/wp-content/uploads/2023/11/MMC-03-20-11-2023-Lista-de-Consulados.pdf> adresinden alındı
- Mohamed, M., Salam, A., Ye, J., & Yong, R. (2024). A Hybrid Triangular Fuzzy SWARA-MAROCS Approach for Selecting Optimal and Smart Logistic Enterprise Based on IoT, Blockchain, and UAVs. *Multicriteria Algo. Appl. Vol. 4*, 1-15.
- Nadhira, A., & Dachyar, M. (2020). Selection Factor Analysis for Internet of Things (IoT) Implementation using DEMATEL based ANP and COPRAS Method at the Hospital Intensive Care Unit (ICU). *International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 7s*, 3614-3622.
- Narayanamoorthy, S., Ramya, L., Kalaiselvan, S., Kureethara, J. V., & Kang, D. (2021). Use of DEMATEL and COPRAS method to select best alternative fuel for control of impact of greenhouse gas emissions. *Socio-Economic Planning Sciences*.

- Nguyen, N.-A.-T., Wang, C.-N., Dang, L.-T.-H., Dang, L.-T.-T., & Dang, T.-T. (2022). Selection of Cold Chain Logistics Service Providers Based on a Grey AHP and Grey COPRAS Framework: A Case Study in Vietnam. *MDPI*.
- Okpara, G. (2020, Şubat 15). Effect of Vessel Registration Policy on the Survival of Local Ship Owners/Operators in Rivers State, Nigeria. Nijerya: Faculty of Management Sciences, Rivers State University, Nkpolu-Oroworukwo, Port Harcourt, Nigeria.
- Organ, A., & Yalçın, E. (2016). Performance Evaluation Of Research Assistants By Copras Method. *European Scientific Journal* , 1857-7431.
- Ozdogoglu, A., Oztas, G. Z., Keles, M. K., & Genc, V. (2022). A comparative bus selection for intercity transportation with an integrated PIPRECIA & COPRAS-G. *Case Studies on Transport Policy* 10, 993-1004.
- Pajić, V., Andrejić, M., & Kilibarda, M. (2021). Evaluation And Selection Of Kpi In Procurement And Distribution Logistics Using Swara-Qfd Approach. *International Journal for Traffic and Transport Engineering (IJTTE)*.
- Pajic, V., Andrejic, M., Jolovic, M., & Kilibarda, M. (2024). Strategic Warehouse Location Selection in Business Logistics: A Novel Approach Using IMF SWARA–MARCOS—A Case Study of a Serbian Logistics Service Provider. *MDPI*.
- Panama Maritime Authority. (2023, Haziran 29). Consulate General of Panama in Marseille: [https://www.consulatgeneraldepanamamarseille.com/comunicadocopy/adresinden alındı](https://www.consulatgeneraldepanamamarseille.com/comunicadocopy/adresinden%20alindi)
- Paris MOU. (2023). *2022 Performance lists Paris MoU*. Paris Mou.
- Paris MOU. (2024, Ekim 5). *White, Grey and Black List*. White, Grey and Black List: <https://parismou.org/Statistics%26Current-Lists/white-grey-and-black-list> adresinden alındı
- Paris Mou Port State Control. (2024). *White, Grey and Black List*. Parismou.org: <https://parismou.org/Statistics%26Current-Lists/white-grey-and-black-list> adresinden alındı
- Park, S., Kim, T., Ryua, H., Kim, H., & Kwon, J. (2022). The economic effect and policy performance of ship registration—A case of Korea. *Marine Policy*.
- Piniella, F., Alcaide, J., & Rodríguez-Díaz, E. (2017). The Panama Ship Registry: 1917–2017. *Marine Policy*, 13-22.

- Porter, M. E. (1990). *The Competitive Advantage of Nations*. New York, NY: Free Press.
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Prioritizing the solutions of reverse logistics implementation to mitigate its barriers: A hybrid modified SWARA and WASPAS approach . *Journal of Cleaner Production*.
- Riasi, A. (2015). Competitive Advantages of Shadow Banking Industry: An Analysis Using Porter Diamond Model. *Business Management and Strategy*, 15-27.
- Rogers, R. (2010). Ship registration : a critical analysis. *Masters Of Science In Maritime Affairs* . Malmö, İsveç: The Maritime Commons: Digital Repository of the World Maritime The Maritime Commons: Digital Repository of the World Maritime University.
- Rosiana, E., Garside, A. K., & Amallynda, I. (2021). Integration of Rough SWARA and COPRAS in the Performance Evaluation of Third-Party Logistics Providers. *Jurnal Teknik Industri Vol 22 No 1*, 31-42.
- Shaheen, M. A. (2016). Ship Registration in Panama, Singapore, Bangladesh Flag: A Comparative Study Approach . *International Journal of Science and Research (IJSR)*.
- Shaheen, M. A. (2018). Ship Registration in Panama, Singapore, Bangladesh Flag: A Comparative Study Approach. *International Journal of Science and Research (IJSR)*.
- Silos, J., Piniella, F., Monedero, J., & Walliser, J. (2011). Trends in the global market for crews: A case study. *Marine Policy*.
- Tanaka, Y. (2015). *The International Law of the Sea* . Copenhagen: Cambridge.
- Toygar, A., Yildirim, U., & İnegöl, G. M. (2022). Investigation of empty container shortage based on SWARA-ARAS methods in the COVID-19 era. *European Transport Research Review*.
- Tozar, B., & Güzel, E. (2012). Türk Boğazları İçin Gemi Risk Modeli Önerisi. *Denizcilik Fakültesi Dergisi*.
- Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği [TOBB]. (2012). *Türkiye Mobilya Ürünleri Meclisi Sektör Raporu*. Ankara: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği.
- Ulutas, A., Karakus, C. B., & Topal, A. (2020). Location selection for logistics center with fuzzy SWARA and cocoso methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*.

- UN Trade and Development [UNCTAD]. (2021). *Review of Maritime Transport*. New York: UN Trade and Development.
- UNCTAD. (2020). *Review of Maritime Transport*. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development .
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport*. United Nations Publications.
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport*. United Nations Publications.
- UNCTAD. (2024, Eylül 28). *Merchant fleet*. UNCTAD: https://hbs.unctad.org/merchant-fleet/#Ref_RZKIDFBS adresinden alındı
- UNCTAD. (2024). *Review of Maritime Transport*. United Nations Publications.
- Xiang, Z., Naseem, M. H., & Yang, J. (2022). Selection of Coal Transportation Company Based on Fuzzy SWARA-COPRAS Approach. *MDPI*.
- Yin, J., Fan, L., & Li, K. X. (2018). Second ship registry in flag choice mechanism: The implications for China in promoting a maritime cluster policy. *Transportation Research Part A*, 152-165.
- Yuan, Y., Xu, Z., & Zhang, Y. (2022). The DEMATEL–COPRAS hybrid method under probabilistic linguistic environment and its application in Third Party Logistics provider selection. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 137-156.
- Yuanyuan, X. (2021). Comparative Study of Different Ship Registries And Reflection On China's Innovation Of International Ship Registration System. Dalian, The People's Republic of China: World Maritime University.
- Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). *Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment*. Londra: E & FN SPON.
- Zolfani, S. H., Görçün, Ö. F., & Küçükönder, H. (2021). Evaluating Logistics Villages In Turkey Using Hybrid Improved Fuzzy Swara (Imf Swara) And Fuzzy Mabac Techniques. *Technological and Economic Development of Economy*.



A DECISION SUPPORT MODEL FOR CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT IN MARITIME TRANSPORTATION BASED ON SPHERICAL FUZZY INFORMATION

KÜRESEL BULANIK BİLGİYE DAYALI DENİZ TAŞIMACILIĞINDA SİBER GÜVENLİK RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN BİR KARAR DESTEK MODELİ

Veysel TATAR¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1579978>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
vtatar@artvin.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
05.11.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
18.11.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
29.11.2024

Abstract

The increasing technological innovations in the maritime industry, which plays an important role in the global supply chain, have the potential to introduce significant risks in terms of cyber threats. Therefore, this study proposes a cybersecurity risk assessment approach using spherical fuzzy (SF) set information based on the Fine-Kinney method to prioritize potential cyber threats/hazards for navigation systems in maritime transportation. The Fine-Kinney risk parameters (probability (P), exposure (E) and consequence (C)) are weighted using SF-based the LOfarithmic DEcomposition of Criteria Importance (LODECI) approach. The ranking of potential cybersecurity threats/hazards is evaluated using SF-based the Alternative Ranking Technique based on Adaptive Standardized Intervals (ARTASI), which provides more adaptability in managing the uncertainty present in expert assessments. The integration of these methodologies with the employment of SF sets results in the formulation of the proposed hybrid SF-LODECI-SF-ARTASI based on Fine-Kinney risk assessment model. Upon evaluation of the proposed model, it becomes evident that the most significant cyber threat/hazard that can impact the cyber security of critical systems on a ship is CYB1 "Accessing the AIS network to obtain vessel position, speed and route information." In general, when the top five most important cybersecurity threats are analyzed, it is determined from the results that the most vulnerable systems to cyber threats/hazards are AIS, GPS and ECDIS, respectively. Finally, a comparative analysis is conducted using an alternative methodology to test the results of the model.

Keywords: Cybersecurity, maritime transportation, risk assessment, spherical fuzzy sets, ARTASI.

Öz

Küresel tedarik zincirinde önemli bir rol oynayan denizcilik sektöründeki artan teknolojik yenilikler, siber tehditler açısından önemli riskler getirme potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bu çalışma, deniz taşımacılığında navigasyon sistemleri için olası siber tehditleri/tehlikeleri önceliklendirmek için Fine-Kinney yöntemine dayalı küresel bulanık (SF) küme bilgilerini kullanan bir siber güvenlik risk değerlendirme yaklaşımı önermektedir. Fine-Kinney risk parametreleri (olasılık (P), maruz kalma (E) ve sonuç (C)), SF tabanlı Kriter Önemini Logaritmik Ayrıştırılması (LODECI) yaklaşımı kullanılarak ağırlıklandırılır. Olası siber güvenlik tehditlerinin/tehlikelerinin sıralaması, uzman değerlendirmelerinde mevcut olan belirsizliği yönetmede daha fazla uyurlanabilirlik sağlayan SF tabanlı Adaptif Standartlaştırılmış Aralıklara Dayalı Alternatif Sıralama Tekniği (ARTASI) kullanılarak değerlendirilir. Bu metodolojilerin SF setlerinin kullanımı ile entegrasyonu, Fine-Kinney risk değerlendirme modeline dayalı olarak önerilen hibrit SF-LODECI-SF-ARTASI modelinin formüle edilmesiyse sonuçlanmıştır. Önerilen model değerlendirildiğinde, bir gemideki kritik sistemlerin siber güvenliğini etkileyebilecek en önemli siber tehdit/tehlikenin CYB1 "Gemi konumu, hızı ve rota bilgilerini elde etmek için AIS ağına erişim" olduğu ortaya çıkmaktadır. Genel olarak, en önemli beş siber güvenlik tehdidi analiz edildiğinde, sonuçlardan siber tehditlere/tehlikelere karşı savunmasız sistemlerin sırasıyla AIS, GPS ve ECDIS olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, modelin sonuçlarını test etmek için alternatif bir metodoloji kullanılarak karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Siber güvenlik, deniz taşımacılığı, risk değerlendirmesi, küresel bulanık kümeler, ARTASI.

¹ Artvin Çoruh University, Maritime and Port Management Program, Artvin, Türkiye.
vtatar@artvin.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-4285-6854.

1. INTRODUCTION

The issue of cybersecurity represents a crucial security concern for the maritime industry, which plays a substantial role in international trade. The necessity for precise cyber-risk assessments is becoming increasingly crucial in order to guarantee economic and physical security, given the growing technological dependence and sophistication of maritime systems (Tam & Jones, 2019). Maritime cyber risk is defined as the degree to which a technology asset is vulnerable to a potential incident that could result in operational, safety or security failures in the context of shipping. Such incidents may arise from the corruption, loss or compromise of information or systems (IMO, 2022). Maritime cyber security may be defined as the policies, procedures and technologies employed to safeguard vessels, ports, shipping companies and associated infrastructure from the risks resulting from cyber-attacks (Haugli-Sandvik et al., 2024). The remote and secure control of marine system parameters offers a number of advantages with regard to more sustainable operations. These include improved human performance through closer cooperation between ship and shore personnel, a reduction in greenhouse gas emissions, an enhanced emergency response capability, and the ability to determine the location of a vessel (Bolbot et al., 2022a). Nevertheless, despite the aforementioned advantages, it is susceptible to a multitude of cybersecurity risks.

In the publication on cybersecurity on ships by the Baltic and International Maritime Council (BIMCO), the concept of cybersecurity is described as the protection of Information Technology (IT), Operational Technology (OT), information and data against unauthorised access, manipulation and disruption (BIMCO, 2020). In evaluating the cybersecurity of the Ship Security Assessment (SSA), it is essential to consider the distinctive IT and OT configurations of each vessel. In general, a greater reliance on IT and OT systems should be associated with an increased cybersecurity risk, given that the consequences of a potential cyber attack would be significantly more disruptive (EMSA, 2023). The utilization of cybertechnologies has become a fundamental aspect of the operation and management of a multitude of systems that are of paramount importance to the safety and security of maritime transportation and the sustainability of the marine environment. The aforementioned critical systems can be summarised as follows (Svilicic et al., 2019; IMO, 2022):

- Bridge navigation and radio systems
 - RADAR (Radio Detection And Ranging)
 - ECDIS (Electronic Chart Display Information System)
 - AIS (Automatic Identification System)
 - GPS (Global Positioning System)
 - VDR (Voyage Data Recorder)
 - GMDSS (Global Maritime Distress And Safety System)
- Cargo handling and management systems
 - Control systems
 - Monitoring systems
 - Alarm systems
- Access control systems
- Passenger servicing and management systems
- Passenger facing public networks
- Administrative and crew welfare systems

- Communication systems

Figure 1 presents a summary of the critical systems of ships.



Figure 1. Critical Systems of Ship (IMO, 2022)

The maritime transportation sector has been significantly impacted by cyber attacks, resulting in prolonged operational disruptions and substantial economic and reputational losses for numerous companies (Uflaz et al., 2024). A shipboard incident resulted in the disruption of the vessel's operations and the imposition of significant economic costs due to an infection in the Electronic Chart Display Information System (ECDIS) (Bolbot et al., 2020). The potential for vulnerabilities to arise in the AIS system of a ship, which is of great significance in ensuring the safe passage of maritime traffic, can present significant challenges for the relevant authorities in making critical decisions in the event of an attack involving the use of malware (Soner et al., 2024). In light of the growing importance of autonomous ships in the future of maritime trade, it is imperative to address potential security gaps in the AIS system and guarantee navigational safety. This can be achieved by meticulously examining the interrelationship between safety and cybersecurity (Chaal et al., 2023). In the cyber security guide for ships published by the Baltic and International Maritime Council (BIMCO), the stages of cyber security risk management for the maritime industry are shown in Figure 2.

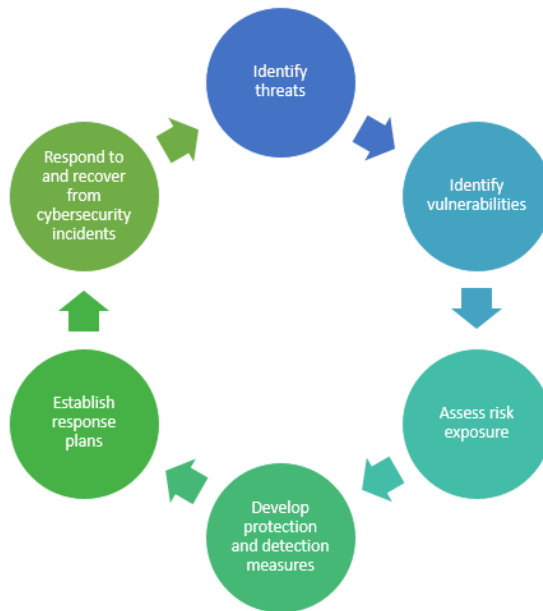


Figure 2. Cybersecurity Risk Management Framework (BIMCO, 2020)

A variety of methods have been employed in the field of risk assessment of in the maritime sector. Wan et al. (2019) proposed an innovative fuzzy Bayesian-based Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) approach for the assessment of maritime supply chain risks. Tam and Jones (2019) proposed the Maritime Cyber-Risk Assessment (MaCRA), a model-based risk assessment framework that considers a combined analysis of cyber and maritime factors. Bayazit and Kaptan (2023) presented a risk assessment model based on the Fuzzy Bayesian Network approach to identify sources of marine pollution from ship operations. Park et al. (2023) developed a new model, FMEA with a Rule-based Bayesian Network (RBN), within the scope of risk management of maritime cyber threats. Bolbot et al. (2020) developed a novel model, designated as the Cyber Preliminary Hazard Analysis (CPHA), for the assessment of cyber risks associated with the navigation and propulsion systems of inland waterway autonomous ships. Bolbot et al. (2022b) utilized a model based on Failure Modes, Vulnerabilities and Effects Analysis to identify potential cyber attack scenarios on a marine dual fuel engine.

The present study employed the traditional Fine-Kinney methodology for the purpose of conducting a risk assessment. In the classic version of the Fine-Kinney model, as initially proposed, a risk value is derived through a calculation involving the multiplication of probability (P), exposure (E), and consequence (C) parameters (Gul et al., 2021a). Nevertheless, the most significant limitations of the Fine-Kinney risk assessment model are that it fails to account for the inherent uncertainty in expert opinions and that it does not incorporate the relative importance weights of risk parameters in the risk rating (Wang et al., 2024). In this context, numerous studies have

addressed the problem of risk assessment by integrating the transformation of uncertain risk rating information, fuzzy set versions, and a number of techniques with the Fine-Kinney method (Ilbahar et al., 2018; Wang et al., 2023; Ayvaz et al., 2024).

The motivation behind this study is to develop a hybrid cyber security risk assessment tool for potential cyber threats/hazards in maritime transport. This is to address the gap in the existing literature on this topic. The assessment tool will use spherical fuzzy set (SFS) information. In this context, a hybrid cybersecurity risk assessment model based on Fine-Kinney is presented, which integrates spherical fuzzy sets (SFSs), Spherical Weighted Geometric Mean (SWGGM) operator, ARTASI (Pamucar et al., 2024) and LODECI (Pala, 2024).

1.1. Study Objectives and Contributions

The present study aims to advance the existing literature on maritime transportation cybersecurity in a more nuanced manner. This objective is to be attained by identifying novel perspectives for prospective research and furnishing policymakers with recommendations regarding measures that can be implemented to develop resilient maritime cybersecurity critical infrastructure, designed to address both current and future threats/hazards.

The following is a summary of the contributions made by this study:

- **Construction of a Cybersecurity Decision Support System:** The study presents a novel cybersecurity decision support model, designated as the SF-LODECI-SF-ARTASI method on the basis of Fine-Kinney, which is proposed as a cybersecurity risk assessment in the maritime sector. This model incorporates SFSs, SWGGM, LODECI, ARTASI, and Fine-Kinney methods, thereby offering a novel perspective in the existing literature.
- **Reasonable Cybersecurity Risk Assessment:** The risk assessment provided by experts can be modelled utilizing the SFSs-based formulation method. The SFSs facilitate the expression of experts' cognitive judgments and subjective assessments of cybersecurity risk in a more reasonable and compelling manner.
- **Dynamic Rating of Risks:** The ARTASI approach to risk ranking permits the expansion of uncertainty degrees in expert evaluations, thereby facilitating the development of more malleable and adaptable risk analysis in the context of critical maritime transportation systems.
- **The Weighting of Risk Parameters Based on Equilibrium:** The LODECI methodology has been selected as the risk parameter weighting approach in the hybrid model due to its efficacy in consolidating situations that may be susceptible to instability when utilizing alternative criterion weighting methods. This increases the stability of the risk assessment model based on the element of equilibrium.

- The Reverberations for Theory and Management: The study presents a novel methodology based on spherical fuzzy sets for risk assessment model, while simultaneously paving the way for future research endeavours and offering policymakers a distinctive decision-support model to construct resilient maritime cybersecurity systems that can effectively address both current and future threats/hazards.

1.2. The Organizational Structure of the Study

This study is organized into four sections. In Section 2, the methodological framework is described, including steps of the SF-LODECI-SF-ARTASI based on the Fine-Kinney hybrid model and the preliminary phases of the SF process. Section 3 presents a numerical case study that exemplifies the application of the proposed model to a cybersecurity risk assessment. Furthermore, a comparative analysis is provided, comparing the proposed methodology with an alternative approach. Section 4 presents the conclusion, in which the results are discussed in detail. Additionally, this section addresses the limitations of the research and offers recommendations for future studies in this field.

2. METHODOLOGY

2.1. Spherical Fuzzy Sets (SFSs)

The SFSs theory proposed by Kahraman and Kutlu Gündoğdu (2018), is an integration of Pythagorean fuzzy sets and neutrosophic sets. In SFSs, the levels of membership, non-membership and hesitancy must conform to the constraint $0 \leq \mu^2 + \nu^2 + \pi^2 \leq 1$, where μ , ν and π are the respective values of the aforementioned levels, respectively. Moreover, each parameter can be defined independently in the interval $[0,1]$ (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2019). The distinctive capacity of the SFS to address uncertainty and ambiguity sets it apart from other fuzzy set models (Akram et al., 2020). An overview of the fundamental terminology, symbols, and functions associated with the SFSs is provided below (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2020):

Definition I: The description of an SFSs, $\tilde{\mathcal{J}}_s$, of the universe of discourse \mathcal{U} is as follows.

$$p_{\tilde{\mathcal{J}}_s}: \mathcal{U} \rightarrow [0,1], q_{\tilde{\mathcal{J}}_s}: \mathcal{U} \rightarrow [0,1], r_{\tilde{\mathcal{J}}_s}: \mathcal{U} \rightarrow [0,1]$$

and

$$0 \leq p_{\tilde{\mathcal{J}}_s}^2(u) + q_{\tilde{\mathcal{J}}_s}^2(u) + r_{\tilde{\mathcal{J}}_s}^2(u) \leq 1 \quad (u \in \mathcal{U}) \quad (1)$$

$$\tilde{\mathcal{J}}_s = \left\{ \langle s, (p_{\tilde{\mathcal{J}}_s}(u), q_{\tilde{\mathcal{J}}_s}(u), r_{\tilde{\mathcal{J}}_s}(u)) \rangle \mid u \in \mathcal{U} \right\} \quad (2)$$

For each, $p_{\tilde{J}_s}(\mathbf{u})$, $q_{\tilde{J}_s}(\mathbf{u})$, and $r_{\tilde{J}_s}(\mathbf{u})$ are the degree of membership, nonmembership, and hesitancy of s to \tilde{J}_s , respectively. The degree of refusal is $\vartheta(\mathbf{u}) = \sqrt{1 - p^2(\mathbf{u}) - q^2(\mathbf{u}) - r^2(\mathbf{u})}$ (Ali and Garg, 2023).

Definition II: The basic mathematical operations are described as follows.

Addition:

$$\tilde{J}_s \oplus \tilde{V}_s = \left\{ \sqrt{p_{\tilde{J}_s}^2 + p_{\tilde{V}_s}^2 - p_{\tilde{J}_s}^2 \cdot p_{\tilde{V}_s}^2}, q_{\tilde{J}_s}^2 \cdot q_{\tilde{V}_s}^2, \sqrt{\left((1 - p_{\tilde{J}_s}^2) r_{\tilde{J}_s}^2 + (1 - p_{\tilde{V}_s}^2) r_{\tilde{V}_s}^2 - r_{\tilde{J}_s}^2 \cdot r_{\tilde{V}_s}^2 \right)} \right\} \quad (3)$$

Multiplication:

$$\tilde{J}_s \otimes \tilde{V}_s = \left\{ p_{\tilde{J}_s}^2 \cdot p_{\tilde{V}_s}^2, \sqrt{q_{\tilde{J}_s}^2 + q_{\tilde{V}_s}^2 - q_{\tilde{J}_s}^2 \cdot q_{\tilde{V}_s}^2}, \sqrt{\left((1 - q_{\tilde{J}_s}^2) r_{\tilde{J}_s}^2 + (1 - q_{\tilde{V}_s}^2) r_{\tilde{V}_s}^2 - r_{\tilde{J}_s}^2 \cdot r_{\tilde{V}_s}^2 \right)} \right\} \quad (4)$$

Multiplication by a scalar:

$$\tilde{J}_s \otimes x = \left\{ \sqrt{1 - (1 - p_{\tilde{J}_s}^2)^x}, q_{\tilde{J}_s}^x, \sqrt{(1 - p_{\tilde{J}_s}^2)^x - (1 - p_{\tilde{J}_s}^2 - r_{\tilde{J}_s}^2)^x} \right\} \quad (5)$$

x. Power of \tilde{J}_s :

$$\tilde{J}_s^x = \left\{ p_{\tilde{J}_s}^x, \sqrt{1 - (1 - q_{\tilde{J}_s}^2)^x}, \sqrt{(1 - q_{\tilde{J}_s}^2)^x - (1 - q_{\tilde{J}_s}^2 - r_{\tilde{J}_s}^2)^x} \right\} \quad (6)$$

Definition III: The formulation of SWGM with $\mathbf{w}=(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots \mathbf{w}_n)$; $\sum_{i:1}^n \mathbf{w}_i = 1$ is described as follows:

$$\text{SWGM}(\tilde{J}_{s1}, \tilde{J}_{s2}, \dots, \tilde{J}_{sn}) = \frac{\tilde{J}_{s1}^{\mathbf{w}_1} + \tilde{J}_{s2}^{\mathbf{w}_2} + \dots + \tilde{J}_{sn}^{\mathbf{w}_n}}{\left\{ \prod_{i:1}^n p_{\tilde{J}_{sn}}^{\mathbf{w}_i}, \sqrt{1 - \prod_{i:1}^n (1 - q_{\tilde{J}_{sn}}^2)^{\mathbf{w}_i}}, \sqrt{\prod_{i:1}^n (1 - q_{\tilde{J}_{sn}}^2)^{\mathbf{w}_i} - \prod_{i:1}^n (1 - q_{\tilde{J}_{sn}}^2 - r_{\tilde{J}_{sn}}^2)^{\mathbf{w}_i}} \right\}} \quad (7)$$

Definition IV: The score function, designated as $\mathcal{S}(\tilde{J}_s)$, can be defined as follows (Ashraf and Abdullah, 2019):

$$\mathcal{S}(\tilde{J}_s) = \left(\frac{1}{3} \right) \left(2 + (p_{\tilde{J}_s}) - (q_{\tilde{J}_s}) - (r_{\tilde{J}_s}) \right); \mathcal{S}(\tilde{J}_s) \in [0,1]. \quad (8)$$

2.2. The LODECI Technique

The LODECI (Pala, 2024) technique is predicated on the principle of maximal decomposition of each alternative in relation to all other alternatives with respect to each criterion. The decomposition value (DV) of an alternative can be readily determined for each criterion by calculating the maximum distance between the alternative and the others. LODECI utilizes the decision matrix $X = \|x_{ij}\|_{(n \times m)}$

comprising of $A_i (i = 1, \dots, n)$ alternatives and $C_j (j = 1, \dots, m)$ benefit criteria $a_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_j^{max}}$ and cost criteria $a_{ij} = \frac{x_j^{min}}{x_{ij}}$ is the maximum normalization techniques. Normalized decision matrix components are utilized to compute each decision matrix element's DV ($DV_{ij} = \max\{a_{ij} - a_{rj}\} (r \neq i, r = 1, \dots, n)$). Subsequently, the logarithmic DV ($LDV_j = \ln\left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n DV_{ij}}{n}\right)$) is calculated. Finally, the relative importance of the criteria $W_j = \frac{LDV_j}{\sum_{j=1}^m LDV_j}$ are calculated.

2.3. The ARTASI Concept

The ARTASI (Pamucar et al., 2024) method is recommended as an alternative to traditional normalization techniques for standardizing the elements of decision matrices when the decision maker's subjective evaluations and the specificity of the addressed problem are taken into account. This method is particularly suited to the standardization of criteria values in multi-criteria models with more than ten alternatives, where it is appropriate to set the range of values to [1, 100]. This allows for a sufficient range to be established for matching the original criteria values. In the case of smaller-scale multi-criteria models, it is possible to adopt a smaller range threshold for the criteria. The method calculates the aggregated utility levels of the alternatives by defining the utility level of the alternatives with respect to the ideal and anti-ideal value. Finally, it ranks the alternatives according to their aggregated utility levels. Two parameters, ϕ and ψ are used to define the alternatives' utility function. The stabilization parameter of the aggregation function, denoted by the parameter ϕ , which can assume values within the range [1, $+\infty$]. The parameter $\psi \in [0, 1]$ is employed to define the influence of the aggregated levels of the utility of the alternatives in the ultimate decision-making process.

2.4. The Proposed Model for Cybersecurity Risk Assessment Based Fine-Kinney

The Fine-Kinney technique is a methodology that offers an analytical approach to the quantitative assessment of risk (Gul et al., 2018). The calculation of each risk is based on the multiplication of the risk parameters probability (P), exposure (E) and consequence (C). In the proposed hybrid method, the Fine-Kinney risk parameters (P, E and C) are weighted by the SF-LODECI (Yalçın et al., 2024) method and subsequently integrated into the SF-ARTASI (Yalçın et al., 2024) method, thereby determining the cyber threat ranking. The proposed hybrid cybersecurity risk assessment framework is presented in Figure 3.

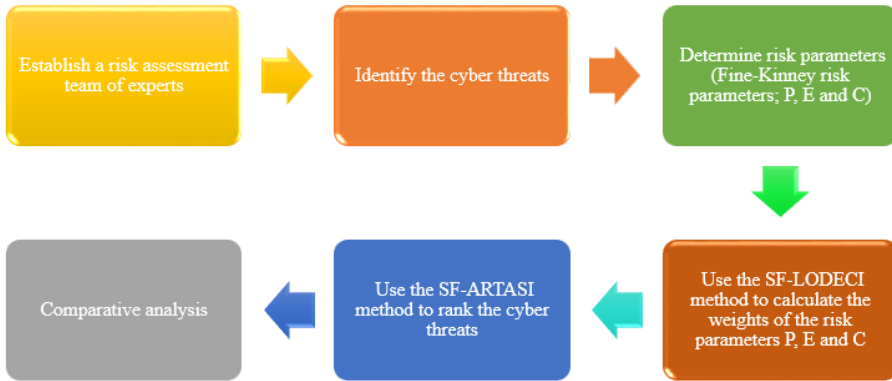


Figure 3. The Proposed Hybrid Cybersecurity Risk Assessment Framework

The cybersecurity risk assessment problem with spherical fuzzy risk information addressed by the ARTASI hybrid model, which is based on the Fine-Kinney approach. Let $(CYB_i) = \{CYB_1, CYB_2, \dots, CYB_m\} (i = 1, 2, \dots, m)$ be cyber threats/ hazards and n risk parameters $(c_j) = \{c_1, c_2, \dots, c_n\} (j = 1, 2, \dots, n)$, and experts $(EX_k) = \{EX_1, EX_2, \dots, EX_q\} (k = 1, 2, \dots, q)$ for the cybersecurity risk assessment problem. The proposed hybrid model consists of the following steps detailed in Table 1.

Table 1. The Steps of the Proposed Hybrid Cybersecurity Risk Assessment Model

| | |
|---|--|
| <p>Fine-Kinney risk parameter weighting based on SF-LODECI:</p> <p>Step 1. The evaluation of each potential cyber threat/hazard (CYB_i) by each expert (EX_k) concerning each risk parameter (c_j) is conducted with reference to the linguistic terms (LTs) illustrated in Table 1a. Subsequent to this evaluation, the LTs are transformed into corresponding SFSs, as delineated in Table 1a, thereby establishing the initial cybersecurity decision risk matrices $[\hat{\mathcal{H}}_{ij}^{(EX_k)}]_{m \times n}$ where $\hat{\mathcal{J}}_{\hat{\mathcal{H}}_{ij}^{(EX_k)}} = \left(p_{\hat{\mathcal{J}}_{\hat{\mathcal{H}}_{ij}^{(EX_k)}}}(u), q_{\hat{\mathcal{J}}_{\hat{\mathcal{H}}_{ij}^{(EX_k)}}}(u), r_{\hat{\mathcal{J}}_{\hat{\mathcal{H}}_{ij}^{(EX_k)}}}(u) \right) (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, q)$</p> <p>The initial cybersecurity decision risk matrices $\hat{\mathcal{H}} = [\hat{\mathcal{H}}_{ij}^k]_{m \times n}$ for each expert k by using SFNs.</p> $\hat{\mathcal{H}} = [\hat{\mathcal{H}}_{ij}^k]_{m \times n} = \begin{matrix} & c_1 & \dots & c_n \\ \begin{matrix} CYB_1 \\ \vdots \\ CYB_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \Delta_{11}^k & \dots & \Delta_{1n}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_{m1}^k & \dots & \Delta_{mn}^k \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (9)$ <p>Here, $\Delta_{ij}^k = \hat{\mathcal{J}}_{\hat{\mathcal{H}}_{ij}^k} (p_{\Delta_{ij}^k}, q_{\Delta_{ij}^k}, r_{\Delta_{ij}^k})$ refers to the degree of membership, the non-membership degree, and the hesitancy value of cyber threats CYB_i regard to criterion c_j (Fine-Kinney risk parameter; P, E, C) ($i = 1, 2, \dots, m$ and $j = 1, 2, \dots, n$).</p> <p>Step 2. The aggregated decision risk matrix $\hat{\mathcal{H}} = [\hat{\mathcal{H}}_{ij}]_{m \times n}$ is computed utilizing the SWGM aggregation operator, as detailed in Eq. (10). In Eq. (10), the weight vector of the expert is represented as $w_k = (w_1, w_2, \dots, w_q)$, with $w_k \in [0, 1]$ and $\sum_{k=1}^q w_k = 1$.</p> $\text{SWGM}w(\hat{\mathcal{H}}^{(EX_1)}, \hat{\mathcal{H}}^{(EX_2)}, \dots, \hat{\mathcal{H}}^{(EX_q)}) = \sum_{k=1}^q w_k \hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}$ $= \left\{ \prod_{i=1}^m p_{\hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}}^{w_i}, \sqrt{1 - \prod_{i=1}^m (1 - q_{\hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}}^2)^{w_i}}, \sqrt{\prod_{i=1}^m (1 - q_{\hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}}^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^m (1 - q_{\hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}}^2 - r_{\hat{\mathcal{H}}^{(EX_k)}}^2)^{w_i}} \right\} \quad (10)$ <p>$\psi > 0$</p> | |
|---|--|

Table 1. Continued

| Table 1a. Linguistic terms for SFNs (Kutlu Gündoğdu and Kahraman, 2020) | | | |
|---|------------------------------|-----|-----|
| Linguistic terms | Spherical fuzzy number (SFN) | | |
| | p | q | r |
| Absolutely more importance (AMI) | 0,9 | 0,1 | 0,0 |
| Very high importance (VHI) | 0,8 | 0,2 | 0,1 |
| High importance (HI) | 0,7 | 0,3 | 0,2 |
| Slightly more importance (SMI) | 0,6 | 0,4 | 0,3 |
| Equal importance (EI) | 0,5 | 0,4 | 0,4 |
| Slightly low importance (SLI) | 0,4 | 0,6 | 0,3 |
| Low importance (LI) | 0,3 | 0,7 | 0,2 |
| Very low importance (VLI) | 0,2 | 0,8 | 0,1 |
| Absolutely low importance (ALI) | 0,1 | 0,9 | 0,0 |

Step 3. Use the score function $(S(\tilde{\mathcal{H}}_{ij}))$ in Eq. (11) (Ashraf and Abdullah, 2019) to calculate the crisp values, and generate a crisp cybersecurity decision risk matrix $(\mathcal{C} = [\mathcal{C}_{ij}]_{m \times n})$.

$$S(\tilde{\mathcal{H}}_{ij}) = \left(\frac{1}{3}\right) \left(2 + (p_{\tilde{\mathcal{H}}_{ij}}(\mathbf{u})) - (q_{\tilde{\mathcal{H}}_{ij}}(\mathbf{u})) - (r_{\tilde{\mathcal{H}}_{ij}}(\mathbf{u}))\right); S(\tilde{\mathcal{H}}_{ij}) \in [0,1]. \quad (11)$$

Step 4. Use Eq. (12) to calculate the normalized cybersecurity decision risk matrix $(\mathcal{N} = [\mathcal{N}_{ij}]_{m \times n})$.

$$\mathcal{N}_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{\mathcal{C}_{ij}}{\mathcal{C}_j^{\max}} \text{ if } j \in \text{benefit criteria} \\ \frac{\mathcal{C}_j^{\min}}{\mathcal{C}_{ij}} \text{ if } j \in \text{cost criteria} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Step 5. Use Eq. (13) to calculate the decomposition value matrix $(\mathcal{D} = [\mathcal{D}_{ij}]_{m \times n})$.

$$\mathcal{D}_{ij} = \max\{|\mathcal{N}_{ij} - \mathcal{N}_{rj}|\} \text{ for } r \neq i \text{ and} \quad (13)$$

$\times (r = 1,2, \dots, m; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n)$

Table 1. Continued

Step 6. Use Eq. (14) to calculate the logarithmic decomposition matrix ($\mathbb{L} = [\mathbb{L}_j]_n$).

$$\mathbb{L}_j = \ln \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^m \mathfrak{D}_{ij}}{m} \right) \quad (14)$$

Step 7. Use Eq. (15) to calculate the final weighting of the risk parameter matrix ($\mathbb{W} = [\mathbb{W}_j]_n$).

$$\mathbb{W}_j = \frac{\mathbb{L}_j}{\sum_{j=1}^n \mathbb{L}_j} \quad (15)$$

Threat/hazard ranking based on SF-ARTASI:

Step 8. The crisp cybersecurity decision risk matrix ($\mathfrak{E} = [\mathfrak{E}_{ij}]_{m \times n}$), calculated in accordance with the procedures in Step 3, provides an initial cybersecurity decision risk assessment matrix for the SF-ARTASI method. The crisp cybersecurity decision risk matrix employed in order to calculate the absolute maximum values matrix ($\mathfrak{E}^{max} = [\mathfrak{E}_j^{max}]_n$) and the absolute minimum values matrix ($\mathfrak{E}^{min} = [\mathfrak{E}_j^{min}]_n$), as per the formulae provided in Eqs. (16) and (17), respectively.

$$\mathfrak{E}_j^{max} = \max_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{E}_{ij} + \left\{ \max_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{E}_{ij} \right\}^{1/m} \quad (16)$$

$$\mathfrak{E}_j^{min} = \min_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{E}_{ij} - \left\{ \min_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{E}_{ij} \right\}^{1/m} \quad (17)$$

Table 1. Continued

Step 9. In the following step, the standardized cybersecurity decision risk assessment matrix is derived by applying it to two sub-steps.

Step 9i. The cybersecurity risk assessment matrix can have two types of criteria: cost and benefit. The criteria values must be transformed to a standard base or interval. This approach uses subjective preferences to convert criterion values into a standardized range, unlike traditional normalizing methods that use a criteria interval of [0,1]. The components of the defuzzified cybersecurity decision risk matrix $[\mathfrak{C}_{ij}]_{m \times n}$ are assigned to a randomized range of criteria $[\mathcal{E}^l, \mathcal{E}^u]$, where (\mathcal{E}^l) represents the lower limit of the range and (\mathcal{E}^u) represents the upper limit. The first level of the standardized cybersecurity decision risk matrix $[\mathfrak{B}_{ij}]_{m \times n}$, standardize each element of the defuzzified cybersecurity risk matrix is computed via the application of Eq. (18). Furthermore, the standardized interval $[\mathcal{E}^l, \mathcal{E}^u]$ values equal $[1, 100]$ (Pamucar et al., 2024).

$$\mathfrak{B}_{ij} = \frac{\mathcal{E}^u - \mathcal{E}^l}{\mathfrak{C}_{j}^{max} - \mathfrak{C}_{j}^{min}} \mathfrak{C}_{ij} + \frac{\mathfrak{C}_{j}^{max, \mathcal{E}^l} - \mathfrak{C}_{j}^{min, \mathcal{E}^u}}{\mathfrak{C}_{j}^{max} - \mathfrak{C}_{j}^{min}} \quad (18)$$

Step 9ii. The second-level standardized cybersecurity decision risk matrix $[\mathfrak{X}_{ij}]_{m \times n}$ is derived from the application of Eq. (19).

$$\mathfrak{X}_{ij} = \begin{pmatrix} (\mathfrak{X}_{ij}) = (-\mathfrak{B}_{ij} + \max_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{B}_{ij} + \min_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{B}_{ij}); \text{if } j \in \text{cost criteria} \\ (\mathfrak{X}_{ij}) = (\mathfrak{B}_{ij}); \text{if } j \in \text{benefit criteria} \end{pmatrix} \quad (19)$$

Table 1. Continued

Step 10. In this step, the degree of usefulness of the threats for the ideal and anti-ideal values is determined through the application of two sub-steps.

Step 10i. The degree of usefulness of the ideal value cybersecurity risk matrix $\mathcal{J}^+ = [\mathcal{J}_{ij}^+]_{m \times n}$ is derived from the application of Eq. (20).

$$\mathcal{J}_{ij}^+ = \left(\frac{x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} x_{ij}} \mathbb{W}_j \mathcal{E}^u \right) \quad \text{for } (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (20)$$

where $\mathcal{E}^u = 100$ and \mathbb{W}_j are criterion weights.

Step 10ii. The degree of usefulness of the anti-ideal value cybersecurity risk matrix $\mathcal{J}^- = [\mathcal{J}_{ij}^-]_{m \times n}$ is derived from the application of Eq. (21).

$$\mathcal{J}_{ij}^- = -\mathfrak{N}_{ij} + \max_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{N}_{ij} + \min_{1 \leq i \leq m} \mathfrak{N}_{ij} \quad \text{for } (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (21)$$

where \mathfrak{N}_{ij} is the degree of usefulness. \mathfrak{N}_{ij} derived from Eq. (22).

$$\mathfrak{N}_{ij} = \left(\left(\frac{\min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}}{x_{ij}} \mathbb{W}_j \mathcal{E}^u \right) \right) \quad \text{for } (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

where $\mathcal{E}^u = 100$ and \mathbb{W}_j are criterion weights.

Table 1. Continued

Step 11. The aggregate degree of utility of the threats/hazards for the ideal value cybersecurity risk matrix ($\partial^+ = [\partial_i^+]_m$) and anti-ideal value cybersecurity risk matrix ($\partial^- = [\partial_i^-]_m$), as calculated via the application of Eqs. (23) and (24), respectively.

$$\partial_i^+ = \sum_{j=1}^n \mathcal{J}_{ij}^+ \tag{23}$$

$$\partial_i^- = \sum_{j=1}^n \mathcal{J}_{ij}^- \tag{24}$$

Step 12. The final utility functions cybersecurity risk matrix $\mathbb{S} = [\mathbb{S}_i]_m$ is determined through the utilization of the equation provided in Eq. (25). Subsequently, the highest value of the final utility functions cybersecurity risk matrix represents the most significant threats/hazard.

$$\mathbb{S}_i = \{\partial_i^+ + \partial_i^-\} \{ \psi \cdot f(\partial_i^+)^{\phi} + (1 - \psi) \cdot f(\partial_i^-)^{\phi} \}^{1/\phi}; \psi \in [0, 1]; \phi \in [1, +\infty] \tag{25}$$

where $f(\partial_i^+) = \frac{\partial_i^+}{\partial_i^+ + \partial_i^-}$ and $f(\partial_i^-) = \frac{\partial_i^-}{\partial_i^+ + \partial_i^-}$ represented the additive functions. The two parameters of the utility function of the threats/hazards are assumed to be $\phi = 1$ and $\psi = 0.1$.

3. NUMERICAL CASE FOR CYBERSECURITY RISK ASSESSMENT

This section presents a numerical case of the application and usability of the proposed cybersecurity risk assessment model, specifically focusing on the evaluation of cybersecurity risks associated with cyber threats in the maritime transportation systems sector. In order to provide the comparability of the implementation of the Fine-Kinney based SF-LODECI-SF-ARTASI hybrid model, a numerical case was adapted from the study conducted by Uflaz et al. (2024) in the literature. Furthermore, this numerical case is employed to assess the validity and dependability of the proposed framework through a comparative analysis. The sub-sections that follow are structured to illustrate a particular application and comparative analysis process.

3.1. The Description of the Procedure to Assess Cybersecurity Risk

The issue of cyber risk represents a significant security threat in the maritime sector, as in all other domains. A potential cyberattack on a maritime vessel could have ramifications for the vessel's safety and personnel, the company in terms of economic cost and reputation, the cargo, and potentially the environmental impact in terms of

pollution (Kechagias et al., 2022). In this context, a risk assessment is conducted with the objective of identifying and ranking potential cyber threats/hazards to a ship's critical systems. This is a process of analysing the potential vulnerability of digital systems on a vessel, with the intention of reducing the risk of cyber attacks. The potential nineteen cybersecurity threats/hazards (CYB1,CYB2,...,CYB19) outlined in this paper adapted from cyber attacks against ships, as described in Ref. Uflaz et al. (2024). The potential cybersecurity threats/hazards are presented in tabular form in Table 2.

Table 2. The Potential Cybersecurity Threats/Hazards to the Ship's Critical Systems

| No | Threat/Hazard |
|-------|---|
| CYB1 | Accessing the AIS network to obtain vessel position, speed and route information |
| CYB2 | Infection of the AIS network with malicious software such as viruses or worms to damage or disrupt critical data and systems |
| CYB3 | Accessing the ECDIS network to remove or manipulate vital data including charts, routes or navigation plans |
| CYB4 | Malicious software to infect the ECDIS network, causing damage or corruption of sensitive data and equipment |
| CYB5 | Blocking signal access and causing message interruptions due to excessive traffic in AIS, ECDIS, GPS, NAVTEX, GMDSS, VDR, SSAS networks |
| CYB6 | Diverting GPS signals for the purpose of providing incorrect position, speed or timing information to the receiver |
| CYB7 | Compromising GPS receivers with excessive noise or radio interference, causing the receiver to lose signal or provide inaccurate data |
| CYB8 | Diverting radar to give the incorrect information about the position, speed, or route a ship position, speed or route of a vessel or object |
| CYB9 | Interfering with excessive noise or electromagnetic waves, which may cause the radar signal to be lost or provide incorrect data |
| CYB10 | Diverting the NAVTEX data to provide incorrect data about the meteorological information, navigational hazards, or other safety-vital information |
| CYB11 | Accessing the GMDSS network to extract or change vital information, including distress messages or navigational data |
| CYB12 | Diverting the GMDSS data to provide incorrect information about the location or identity of a vessel, or the details of an emergency situation |
| CYB13 | Malicious software to infect the GMDSS system, compromising its performance or rendering it incapable of providing accurate data |
| CYB14 | Accessing the VDR system without permission, causing change or delete information, including safety, security, navigation and communications data |
| CYB15 | Malicious software to infect the VDR system, compromising its correct functioning or rendering the data it provides inaccurate |
| CYB16 | Diverting the VDR data by changing the timestamps or sensor data, to cause in inaccurate data recording |
| CYB17 | Accessing the SSAS system to change security alert messages |
| CYB18 | Malicious software to infect the SSAS system, causing it to work incorrectly or provide inaccurate data |
| CYB19 | Diverting the SSAS data to provide inaccurate information about the location or identity of a security risk or the status of the vessel |

In order to conduct the risk assessment for potential cybersecurity threats/hazards identified through the proposed framework, a cybersecurity risk assessment team was constituted, comprising nine experts $\{EX_1, EX_2, \dots, EX_9\}$ in maritime and IT fields, selected on the basis of their competence and experience. Following that, experts are asked to evaluate the risk associated with the aforementioned potential cybersecurity threats/hazards, according to the three risk parameters of the Fine-Kinney method (i.e.,

probability (P), exposure (E), and consequence (C)), using the linguistic scale provided in Table 1a. P, E, and C risk parameters are all considered to be benefit criteria (Gul et al., 2021b). The SFN-based risk evaluation matrix for each expert is presented in Table 3.

Table 3. The SFNs-based Risk Evaluation Matrix of Experts

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----|----------|----------|----------|-------|-----|----------|----------|----------|-------|-----|----------|----------|----------|
| | | P | E | C | | | P | E | C | | | P | E | C |
| CYB1 | EX1 | VHI | VHI | AMf | CYB2 | EX1 | HI | VHI | HI | CYB3 | EX1 | HI | HI | VHI |
| | EX2 | HI | AMf | VHI | | EX2 | HI | HI | VHI | | EX2 | HI | VHI | VHI |
| | EX3 | VHI | VHI | VHI | | EX3 | VHI | VHI | VHI | | EX3 | VHI | HI | VHI |
| | EX4 | HI | HI | VHI | | EX4 | HI | HI | VHI | | EX4 | HI | HI | VHI |
| | EX5 | AMf | VHI | AMf | | EX5 | HI | VHI | VHI | | EX5 | HI | VHI | VHI |
| | EX6 | AMf | VHI | VHI | | EX6 | AMf | VHI | VHI | | EX6 | HI | HI | VHI |
| | EX7 | VHI | VHI | VHI | | EX7 | VHI | VHI | VHI | | EX7 | VHI | HI | HI |
| | EX8 | HI | VHI | AMf | | EX8 | HI | VHI | HI | | EX8 | HI | HI | VHI |
| | EX9 | VHI | VHI | AMf | | EX9 | VHI | VHI | HI | | EX9 | HI | VHI | HI |
| | | P | E | C | | | P | E | C | | | P | E | C |
| CYB4 | EX1 | HI | SMf | AMf | CYB5 | EX1 | HI | HI | VHI | CYB6 | EX1 | HI | VHI | HI |
| | EX2 | VHI | HI | VHI | | EX2 | HI | VHI | HI | | EX2 | HI | HI | VHI |
| | EX3 | HI | SMf | VHI | | EX3 | VHI | VHI | VHI | | EX3 | VHI | VHI | VHI |
| | EX4 | VHI | SMf | VHI | | EX4 | HI | HI | VHI | | EX4 | HI | HI | VHI |
| | EX5 | HI | HI | VHI | | EX5 | HI | VHI | VHI | | EX5 | HI | VHI | VHI |
| | EX6 | HI | VHI | AMf | | EX6 | HI | HI | VHI | | EX6 | AMf | VHI | VHI |
| | EX7 | VHI | HI | VHI | | EX7 | VHI | HI | HI | | EX7 | VHI | VHI | VHI |
| | EX8 | HI | HI | VHI | | EX8 | HI | HI | VHI | | EX8 | HI | VHI | AMf |
| | EX9 | HI | VHI | VHI | | EX9 | HI | VHI | HI | | EX9 | VHI | VHI | AMf |
| | | P | E | C | | | P | E | C | | | P | E | C |
| CYB7 | EX1 | VHI | VHI | HI | CYB8 | EX1 | HI | VHI | VHI | CYB9 | EX1 | HI | HI | VHI |
| | EX2 | HI | HI | VHI | | EX2 | HI | HI | VHI | | EX2 | HI | VHI | HI |
| | EX3 | VHI | VHI | VHI | | EX3 | VHI | VHI | VHI | | EX3 | VHI | VHI | VHI |
| | EX4 | HI | HI | VHI | | EX4 | HI | HI | SMf | | EX4 | HI | HI | VHI |
| | EX5 | AMf | VHI | VHI | | EX5 | HI | VHI | SMf | | EX5 | HI | VHI | VHI |
| | EX6 | AMf | VHI | VHI | | EX6 | HI | VHI | VHI | | EX6 | HI | HI | VHI |
| | EX7 | VHI | VHI | VHI | | EX7 | HI | VHI | VHI | | EX7 | VHI | SMf | HI |
| | EX8 | HI | VHI | AMf | | EX8 | HI | VHI | VHI | | EX8 | HI | HI | VHI |
| | EX9 | VHI | VHI | AMf | | EX9 | VHI | VHI | HI | | EX9 | HI | VHI | HI |
| | | P | E | C | | | P | E | C | | | P | E | C |
| CYB10 | EX1 | HI | HI | VHI | CYB11 | EX1 | HI | VHI | VHI | CYB12 | EX1 | HI | HI | HI |
| | EX2 | VHI | SMf | VHI | | EX2 | VHI | HI | HI | | EX2 | VHI | SMf | HI |
| | EX3 | HI | HI | AMf | | EX3 | HI | HI | HI | | EX3 | HI | HI | VHI |
| | EX4 | VHI | SMf | VHI | | EX4 | HI | HI | AMf | | EX4 | VHI | SMf | VHI |
| | EX5 | VHI | HI | AMf | | EX5 | HI | HI | VHI | | EX5 | VHI | HI | VHI |
| | EX6 | VHI | SMf | VHI | | EX6 | VHI | HI | HI | | EX6 | VHI | SMf | HI |
| | EX7 | HI | SMf | AMf | | EX7 | HI | VHI | AMf | | EX7 | HI | SMf | HI |
| | EX8 | HI | SMf | AMf | | EX8 | HI | VHI | VHI | | EX8 | HI | SMf | AMf |
| | EX9 | VHI | SMf | AMf | | EX9 | HI | VHI | HI | | EX9 | VHI | SMf | AMf |

Table 3. Continued

| CYB13 | | | | CYB14 | | | | CYB15 | | | |
|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| | P | E | C | | P | E | C | | P | E | C |
| EX1 | HI | HI | HI | EX1 | HI | SMI | VHI | EX1 | HI | VHI | VHI |
| EX2 | VHI | SMI | HI | EX2 | VHI | HI | VHI | EX2 | HI | HI | VHI |
| EX3 | HI | HI | AMI | EX3 | HI | SMI | VHI | EX3 | VHI | VHI | VHI |
| EX4 | VHI | SMI | VHI | EX4 | VHI | SMI | VHI | EX4 | HI | HI | SMI |
| EX5 | VHI | HI | VHI | EX5 | HI | HI | VHI | EX5 | HI | VHI | SMI |
| EX6 | VHI | SMI | HI | EX6 | HI | HI | VHI | EX6 | HI | VHI | VHI |
| EX7 | HI | SMI | HI | EX7 | VHI | VHI | AMI | EX7 | VHI | VHI | VHI |
| EX8 | HI | SMI | AMI | EX8 | HI | VHI | VHI | EX8 | HI | VHI | HI |
| EX9 | VHI | SMI | AMI | EX9 | HI | VHI | VHI | EX9 | VHI | VHI | HI |

| CYB16 | | | | CYB17 | | | | CYB18 | | | |
|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|
| | P | E | C | | P | E | C | | P | E | C |
| EX1 | HI | VHI | VHI | EX1 | HI | HI | VHI | EX1 | HI | SMI | HI |
| EX2 | VHI | SMI | VHI | EX2 | VHI | HI | HI | EX2 | HI | SMI | SMI |
| EX3 | HI | VHI | VHI | EX3 | HI | HI | VHI | EX3 | SMI | SMI | SMI |
| EX4 | VHI | SMI | VHI | EX4 | HI | HI | AMI | EX4 | SMI | SMI | HI |
| EX5 | HI | VHI | VHI | EX5 | VHI | SMI | VHI | EX5 | HI | HI | HI |
| EX6 | AMI | HI | VHI | EX6 | VHI | HI | VHI | EX6 | HI | HI | VHI |
| EX7 | AMI | SMI | HI | EX7 | HI | VHI | HI | EX7 | VHI | VHI | HI |
| EX8 | HI | SMI | VHI | EX8 | HI | HI | VHI | EX8 | VHI | HI | HI |
| EX9 | HI | VHI | VHI | EX9 | HI | HI | AMI | EX9 | HI | SMI | HI |

| CYB19 | | | |
|-------|-----|-----|-----|
| | P | E | C |
| EX1 | HI | SMI | HI |
| EX2 | HI | SMI | VHI |
| EX3 | VHI | EI | VHI |
| EX4 | VHI | HI | HI |
| EX5 | SMI | HI | VHI |
| EX6 | HI | HI | HI |
| EX7 | HI | SMI | VHI |
| EX8 | VHI | SMI | HI |
| EX9 | HI | HI | VHI |

Based on Table 3, the aggregated cybersecurity decision risk matrix is computed utilizing the SWGM aggregation operator, as presented in Eq. (10). The aggregated cybersecurity decision matrix is provided in Table 4. The weights of the risk parameters (P, E, and C) are calculated by applying the equations in Steps 3, 4, 5, 6, and 7 of SF-LODECI, as outlined in Table 1. The calculated risk parameter weights are presented in Table 5.

Table 4. The Aggregated Cybersecurity Decision Risk Matrix

| No | P | | | E | | | C | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CYB1 | 0,785 | 0,225 | 0,136 | 0,799 | 0,206 | 0,112 | 0,843 | 0,164 | 0,075 |
| CYB2 | 0,753 | 0,255 | 0,162 | 0,777 | 0,227 | 0,131 | 0,765 | 0,239 | 0,143 |
| CYB3 | 0,721 | 0,281 | 0,184 | 0,732 | 0,271 | 0,175 | 0,777 | 0,227 | 0,131 |
| CYB4 | 0,732 | 0,271 | 0,175 | 0,685 | 0,322 | 0,229 | 0,821 | 0,183 | 0,089 |
| CYB5 | 0,721 | 0,281 | 0,184 | 0,743 | 0,261 | 0,165 | 0,765 | 0,239 | 0,143 |
| CYB6 | 0,753 | 0,255 | 0,162 | 0,777 | 0,227 | 0,131 | 0,809 | 0,198 | 0,107 |
| CYB7 | 0,785 | 0,225 | 0,136 | 0,777 | 0,227 | 0,131 | 0,809 | 0,198 | 0,107 |
| CYB8 | 0,721 | 0,281 | 0,184 | 0,777 | 0,227 | 0,131 | 0,739 | 0,271 | 0,184 |
| CYB9 | 0,721 | 0,281 | 0,184 | 0,730 | 0,276 | 0,184 | 0,765 | 0,239 | 0,143 |
| CYB10 | 0,754 | 0,250 | 0,155 | 0,632 | 0,371 | 0,273 | 0,854 | 0,153 | 0,067 |
| CYB11 | 0,721 | 0,281 | 0,184 | 0,743 | 0,261 | 0,165 | 0,774 | 0,237 | 0,148 |
| CYB12 | 0,754 | 0,250 | 0,155 | 0,632 | 0,371 | 0,273 | 0,774 | 0,237 | 0,148 |
| CYB13 | 0,754 | 0,250 | 0,155 | 0,632 | 0,371 | 0,273 | 0,784 | 0,230 | 0,145 |
| CYB14 | 0,732 | 0,271 | 0,175 | 0,695 | 0,313 | 0,222 | 0,811 | 0,192 | 0,094 |
| CYB15 | 0,732 | 0,271 | 0,175 | 0,777 | 0,227 | 0,131 | 0,729 | 0,281 | 0,192 |
| CYB16 | 0,762 | 0,248 | 0,159 | 0,694 | 0,317 | 0,229 | 0,788 | 0,214 | 0,116 |
| CYB17 | 0,732 | 0,271 | 0,175 | 0,698 | 0,304 | 0,208 | 0,797 | 0,212 | 0,122 |

| | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| CYB18 | 0,697 | 0,309 | 0,215 | 0,652 | 0,353 | 0,258 | 0,687 | 0,317 | 0,222 |
| CYB19 | 0,719 | 0,286 | 0,192 | 0,630 | 0,360 | 0,279 | 0,754 | 0,250 | 0,155 |

Table 5. The Weights of the Risk Parameters

| W | P | E | C |
|-------|--------|--------|--------|
| W_j | 0,1908 | 0,4030 | 0,4062 |

Subsequently, following the calculation of the risk parameter weights, the SF-ARTASI steps are implemented. Eqs. (16) and (17) are used to compute the absolute maximum values matrix and the absolute minimum values matrix, respectively. Table 6 provides the absolute maximum values and minimum values matrices.

Table 6. The Absolute Maximum and Minimum Values

| \mathcal{E} | P | E | C |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| \mathcal{E}_j^{max} | 1,7972 | 1,8170 | 1,8710 |
| \mathcal{E}_j^{min} | -0,2589 | -0,3160 | -0,2668 |

The utility functions of threats/hazards for the ideal value cybersecurity risk matrix are calculated by applying steps 9, 10, 11, and 12 of SF-ARTASI, as outlined in Table 1. Table 7 presents the final utility functions cybersecurity risk matrix. The most significant threat/hazard is indicated by the final utility functions cybersecurity risk matrix's highest value.

Table 7. The Utility Functions and Ranking Threats/Hazards

| No | ∂_i^+ | ∂_i^- | S_i | Rank |
|-------|----------------|----------------|--------|------|
| CYB1 | 0,49989 | 0,50011 | 99,699 | 1 |
| CYB2 | 0,49915 | 0,50085 | 96,160 | 4 |
| CYB3 | 0,49885 | 0,50115 | 94,671 | 5 |
| CYB4 | 0,49912 | 0,50088 | 94,521 | 9 |
| CYB5 | 0,49888 | 0,50112 | 94,599 | 7 |
| CYB6 | 0,49929 | 0,50071 | 97,517 | 3 |
| CYB7 | 0,49937 | 0,50063 | 98,014 | 2 |
| CYB8 | 0,49923 | 0,50077 | 94,513 | 10 |
| CYB9 | 0,49881 | 0,50119 | 94,080 | 13 |
| CYB10 | 0,49993 | 0,50007 | 93,893 | 15 |
| CYB11 | 0,49888 | 0,50112 | 94,665 | 6 |
| CYB12 | 0,49935 | 0,50065 | 91,243 | 17 |
| CYB13 | 0,49936 | 0,50064 | 91,479 | 16 |
| CYB14 | 0,49902 | 0,50098 | 94,553 | 8 |
| CYB15 | 0,49928 | 0,50072 | 94,327 | 11 |
| CYB16 | 0,49891 | 0,50109 | 94,075 | 14 |

| | | | | |
|-------|---------|---------|--------|----|
| CYB17 | 0,49886 | 0,50114 | 94,194 | 12 |
| CYB18 | 0,49975 | 0,50025 | 87,891 | 19 |
| CYB19 | 0,49934 | 0,50066 | 90,181 | 18 |

As seen from Table 7, CYB1, CYB7 and CYB6 represent the most significant threat/hazard to be considered respectively. Figure 4 provides a visual representation of the utility functions associated with the identified threats/hazards.

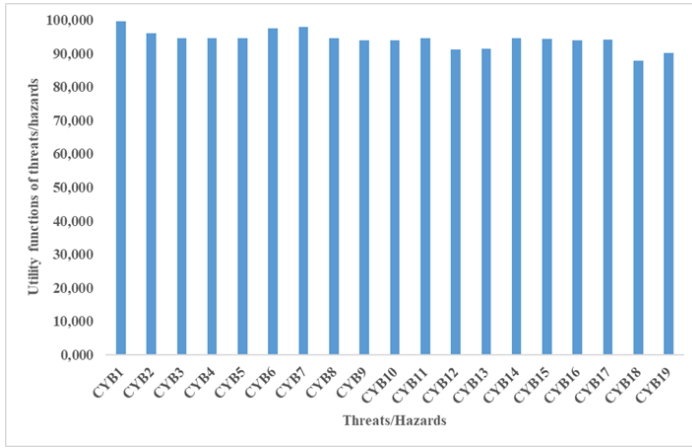


Figure 4. The Utility Functions of Threats/Hazards

3.2. Comparative Analysis

The findings of the risk assessment model proposed in this study are compared in this section with a different ranking method applied in the literature, which is Fine-Kinney based and employs SFs. A comparative analysis was conducted to evaluate the efficacy of the proposed model in relation to the Fine-Kinney-based SF-TOPSIS methodology, as presented by Tatar et al. (2023). The results of the analysis are presented in Figure 5.

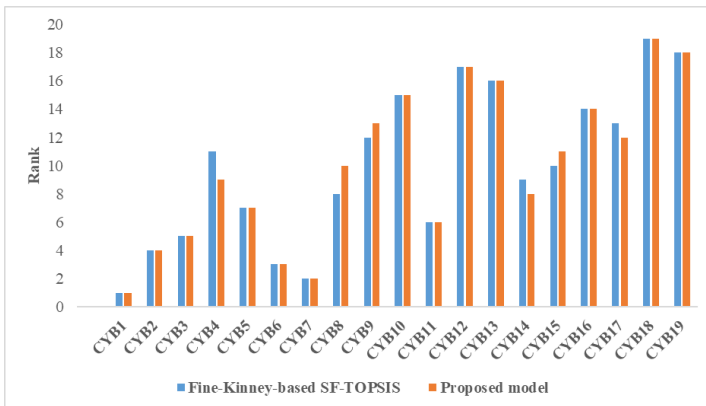


Figure 5. The Results of the Comparative Analysis

Figure 5 illustrates that the threat/hazard rankings are highly similar, as revealed by the findings of the comparison analysis. This stability underscores the efficacy and reliability of the proposed Fine-Kinney-based SF-ARTASI hybrid model.

4. CONCLUSION

The maritime sector is of critical importance in the global supply chain, representing approximately 90% of global trade in the transportation of goods (Alcaide and Llave, 2020). While the pervasive implementation of digital technologies in the maritime industry facilitates operational advancement, it concurrently engenders a series of disadvantages pertaining to cybersecurity (Uflaz et al., 2024). The maritime industry is susceptible to a range of cyber risks, particularly those targeting ship critical systems, and in-port information systems (Ben Farah et al., 2022).

The Fine-Kinney approach provides an efficacious methodology for risk assessment problems (Wang et al., 2023). Nevertheless, this approach is limited in its ability to accurately reflect the judgments of experts under conditions of uncertainty. In order to address the aforementioned cyber security risk assessment problem, which is based in Fine and Kinney, the SWGM operator, LODECI and ARTASI methods are integrated using spherical fuzzy sets. Subsequently, the model is utilized to conduct a risk assessment study for potential cyber threats/hazards to critical maritime transportation systems. Furthermore, the proposed model's robustness and reliability are tested by comparing it to another approach that has been employed in the literature. The findings demonstrate that the proposed model has the potential to provide a beneficial tool for stakeholders engaged in the cybersecurity risk assessment process. Accordingly, the hybrid model developed in this study will guide risk managers and other stakeholders in the identification and ranking of cybersecurity risks related to maritime transportation operations.

The present study has determined 19 potential cyber threats/hazards. According to the study results, the threat/hazard CYB1 "Accessing the AIS network to obtain vessel position, speed and route information" represents the most significant cyber threat/hazard and necessitates the most rigorous attention and protective measures. AIS-transmitted signals lack both encryption and verification, which renders them susceptible to exploitation by malicious actors. This deficiency can facilitate a range of attacks, including the spoofing of messages, the fabrication of ghost ships, the dissemination of false alerts or meteorological data, and other forms of interference (Ribeiro et al., 2023). AIS systems play an important role in maritime communication, providing information about a ship's route and location using GPS coordinates. However, AIS is one of the electronic communication equipment vulnerable to potential cyber attacks (Alcaide and Llave, 2020). Infection of the ECDIS system and its subsequent manipulation have the potential to significantly impact ship operations, resulting in considerable financial losses (Bolbot et al., 2020). The systems that facilitate the navigation of maritime vessels, including AIS, GPS and ECDIS, are dependent on signal processing and transmission principles. Consequently, this structure can make these systems vulnerable to cyber threats (Tusher et al., 2022). Organizations in the maritime sector must take a proactive stance against cyber threats (Afenyo and Caesar, 2023). In the maritime transportation, weaknesses in a vessel's bridge system (Uflaz et al., 2024) may give rise to considerable issues with

regard to cyber threats to navigation systems. Such challenges have the potential to result in significant financial losses with global trade.

The remaining ones have been ranked as follows: CYB7 “Compromising GPS receivers with excessive noise or radio interference, causing the receiver to lose signal or provide inaccurate data”>CYB6 “Diverting GPS signals for the purpose of providing incorrect position, speed or timing information to the receiver”>CYB2 “Infection of the AIS network with malicious software such as viruses or worms to damage or disrupt critical data and systems”>CYB3 “Accessing the ECDIS network to remove or manipulate vital data including charts, routes or navigation plans”>CYB11 “Accessing the GMDSS network to extract or change vital information, including distress messages or navigational data”>CYB5 “Blocking signal access and causing message interruptions due to excessive traffic in AIS, ECDIS, GPS, NAVTEX, GMDSS, VDR, SSAS networks”>CYB14 “Accessing the VDR system without permission, causing change or delete information, including safety, security, navigation and communications data”>CYB4 “Malicious software to infect the ECDIS network, causing damage or corruption of sensitive data and equipment”>CYB8 “Diverting radar to give the incorrect information about the position, speed, or route a ship position, speed or route of a vessel or object”>CYB15 “Malicious software to infect the VDR system, compromising its correct functioning or rendering the data it provides inaccurate”>CYB17 “Accessing the SSAS system to change security alert messages”>CYB9 “Interfering with excessive noise or electromagnetic waves, which may cause the radar signal to be lost or provide incorrect data”>CYB16 “Diverting the VDR data by changing the timestamps or sensor data, to cause in inaccurate data recording”>CYB10 “Diverting the NAVTEX data to provide incorrect data about the meteorological information, navigational hazards, or other safety-vital information”>CYB13 “Malicious software to infect the GMDSS system, compromising its performance or rendering it incapable of providing accurate data”>CYB12 “Diverting the GMDSS data to provide incorrect information about the location or identity of a vessel, or the details of an emergency situation”>CYB19 “Diverting the SSAS data to provide inaccurate information about the location or identity of a security risk or the status of the vessel”>CYB18 “Malicious software to infect the SSAS system, causing it to work incorrectly or provide inaccurate data”.

It is recommended that future research address the limitations of the proposed approach, which are as follows: First, the incorporation of data concerning cyber threats to ship navigation systems, in addition to the potential for cyber attacks on satellite link systems between land and sea, may have an impact on the results. Second, the different parameters can be added in addition to the three risk parameters. Furthermore, the integration of diverse weighting methodologies may provide a more rational approach to parameter weight calculation. In addition, for future research, the Fine-Kinney based ARTASI risk assessment strategy can be integrated with various ranking techniques using different fuzzy sets rather than spherical fuzzy sets. Moreover, future studies may utilize the presented hybrid methodology in disparate domains, such as finance and energy, and subsequently undertake a comparative analysis of the outcomes.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study.

REFERENCES

- Afenyo, M., & Caesar, L. D. (2023). Maritime cybersecurity threats: Gaps and directions for future research. *Ocean & Coastal Management*, 236, 106493.
- Akram, M., Alsulami, S., Khan, A., & Karaaslan, F. (2020). Multi-criteria group decision-making using spherical fuzzy prioritized weighted aggregation operators. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 13(1), 1429-1446.
- Alcaide, J. I., & Llave, R. G. (2020). Critical infrastructures cybersecurity and the maritime sector. *Transportation Research Procedia*, 45, 547-554.
- Ali, J., & Garg, H. (2023). On spherical fuzzy distance measure and TAOV method for decision-making problems with incomplete weight information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119, 105726.
- Ashraf, S., & Abdullah, S. (2019). Spherical aggregation operators and their application in multiattribute group decision-making. *International Journal of Intelligent Systems*, 34(3), 493-523.
- Ayvaz, B., Tatar, V., Sağır, Z., & Pamucar, D. (2024). An integrated Fine-Kinney risk assessment model utilizing Fermatean fuzzy AHP-WASPAS for occupational hazards in the aquaculture sector. *Process Safety and Environmental Protection*, 186, 232-251.
- Baltic and International Maritime Council (BIMCO), (2020). The Guidelines on Cyber Security Onboard Ships- Version 4. <https://www.bimco.org/about-us-and-our-members/publications/the-guidelines-on-cyber-security-onboard-ships>
- Bayazit, O., & Kaptan, M. (2023). Evaluation of the risk of pollution caused by ship operations through bow-tie-based fuzzy Bayesian network. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135386.
- Ben Farah, M. A., Ukwandu, E., Hindy, H., Brosset, D., Bures, M., Andonovic, I., & Bellekens, X. (2022). Cyber security in the maritime industry: A systematic survey of recent advances and future trends. *Information*, 13(1), 22.
- Bolbot, V., Kulkarni, K., Brunou, P., Banda, O. V., & Musharraf, M. (2022a). Developments and research directions in maritime cybersecurity: A systematic literature review and bibliometric analysis. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 39, 100571.

- Bolbot, V., Methlouthi, O., Banda, O. V., Xiang, L., Ding, Y., & Brunou, P. (2022b). Identification of cyber-attack scenarios in a marine Dual-Fuel engine. *Trends in Maritime Technology and Engineering*, 503-510.
- Bolbot, V., Theotokatos, G., Boulougouris, E., & Vassalos, D. (2020). A novel cyber-risk assessment method for ship systems. *Safety Science*, 131, 104908.
- Chaal, M., Ren, X., BahooToroody, A., Basnet, S., Bolbot, V., Banda, O. A. V., & Van Gelder, P. (2023). Research on risk, safety, and reliability of autonomous ships: A bibliometric review. *Safety science*, 167, 106256.
- European Maritime Safety Agency (EMSA), (2023). Guidance on how to address cybersecurity onboard ships during audits, controls, verifications and inspections- MARSEC Doc. 9209. <https://www.emsa.europa.eu/publications/inventories/item/5074-guidance-on-how-to-address-cybersecurity-onboard-ships-during-audits,-controls,-verifications-and-inspections.html>
- Gul, M., Guven, B., & Guneri, A. F. (2018). A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 3-16.
- Gul, M., Mete, S., Serin, F., Celik, E. (2021a). Fine–Kinney Occupational Risk Assessment Method and Its Extensions by Fuzzy Sets: A State-of-the-Art Review. *Fine–Kinney-Based Fuzzy Multi-Criteria Occupational Risk Assessment: Approaches, Case Studies and Python Applications*, 1-11, Springer, Cham.
- Gul, M., Mete, S., Serin, F., Celik, E. (2021b). Fine–Kinney-Based Occupational Risk Assessment Using Intuitionistic Fuzzy TODIM. *Fine–Kinney-Based Fuzzy Multi-Criteria Occupational Risk Assessment: Approaches, Case Studies and Python Applications*, 69-89, Springer, Cham.
- Haugli-Sandvik, M., Lund, M. S., & Bjørneseth, F. B. (2024). Maritime decision-makers and cyber security: deck officers' perception of cyber risks towards IT and OT systems. *International Journal of Information Security*, 23, 1721–1739.
- Ilbahar, E., Karaşan, A., Cebi, S., & Kahraman, C. (2018). A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system. *Safety Science*, 103, 124-136.
- International Maritime Organisation (IMO), (2022). Guidelines On Maritime Cyber Risk Management, MSC-FAL.1/Circ.3/Rev.2.
- Kahraman, C., and Kutlu Gündoğdu, F. (2018). From 1D to 3D membership:spherical fuzzy sets. BOS / SOR 2018 Conference, Warsaw, Poland.

- Kechagias, E. P., Chatzistelios, G., Papadopoulos, G. A., & Apostolou, P. (2022). Digital transformation of the maritime industry: A cybersecurity systemic approach. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 37, 100526.
- Kutlu Gündoğdu, F., & Kahraman, C. (2020). A novel spherical fuzzy analytic hierarchy process and its renewable energy application. *Soft Computing*, 24, 4607-4621.
- Kutlu Gündoğdu, F., and Kahraman, C. (2019). A novel fuzzy TOPSIS method using emerging interval-valued spherical fuzzy sets. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85, 307-323.
- Pala, O. (2024). Assessment of the social progress on European Union by logarithmic decomposition of criteria importance. *Expert Systems With Applications*, 238, 121846.
- Pamucar, D., Simic, V., Görçün, Ö. F., & Küçükönder, H. (2024). Selection of the best Big Data platform using COBRAC-ARTASI methodology with adaptive standardized intervals. *Expert Systems with Applications*, 239, 122312.
- Park, C., Kontovas, C., Yang, Z., & Chang, C. H. (2023). A BN driven FMEA approach to assess maritime cybersecurity risks. *Ocean & Coastal Management*, 235, 106480.
- Ribeiro, C. V., Paes, A., & de Oliveira, D. (2023). AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. *Expert Systems with Applications*, 231, 120561.
- Soner, O., Kayisoglu, G., Bolat, P., & Tam, K. (2024). Risk sensitivity analysis of AIS cyber security through maritime cyber regulatory frameworks. *Applied Ocean Research*, 142, 103855.
- Svilicic, B., Kamahara, J., Celic, J., & Bolmsten, J. (2019). Assessing ship cyber risks: A framework and case study of ECDIS security. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 18, 509-520.
- Tam, K., & Jones, K. (2019). MaCRA: A model-based framework for maritime cyber-risk assessment. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 18, 129-163.
- Tatar, V., Yazicioglu, O., & Ayvaz, B. (2023). A novel risk assessment model for work-related musculoskeletal disorders in tea harvesting workers. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 44(2), 2305-2323.
- Tusher, H. M., Munim, Z. H., Notteboom, T. E., Kim, T. E., & Nazir, S. (2022). Cyber security risk assessment in autonomous shipping. *Maritime economics & Logistics*, 24, 208-227.

- Uflaz, E., Sezer, S. I., Tunçel, A. L., Aydin, M., Akyuz, E., & Arslan, O. (2024). Quantifying potential cyber-attack risks in maritime transportation under Dempster–Shafer theory FMECA and rule-based Bayesian network modelling. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109825.
- Wan, C., Yan, X., Zhang, D., Qu, Z., & Yang, Z. (2019). An advanced fuzzy Bayesian-based FMEA approach for assessing maritime supply chain risks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 222-240.
- Wang, W., Han, X., Ding, W., Wu, Q., Chen, X., & Deveci, M. (2023). A Fermatean fuzzy Fine–Kinney for occupational risk evaluation using extensible MARCOS with prospect theory. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 117, 105518.
- Wang, Y., Wang, W., Deveci, M., & Yu, X. (2024). An integrated interval-valued spherical fuzzy Choquet integral based decision making model for prioritizing risk in Fine–Kinney. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127, 107437.
- Yalçın, G. C., Kara, K., & Senapati, T. (2024). A hybrid spherical fuzzy logarithmic decomposition of criteria importance and alternative ranking technique based on Adaptive Standardized Intervals model with application. *Decision Analytics Journal*, 11, 100441.



A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FACTORS INFLUENCING UNIVERSITY STUDENTS' MICROMOBILITY PREFERENCES USING K-NEAREST NEIGHBORS AND LOGISTIC REGRESSION MODELS

K- EN YAKIN KOMŞULAR VE LOJİSTİK REGRESYON MODELLERİ
KULLANILARAK ÜNİVERSİTE ÖĞRENCİLERİNİN MİKRO-MOBİLİTE
TERCİHLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Mahmut Esad ERGİN¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1544658>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
mahmutesadergin@aydin.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
06.09.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
25.11.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
06.12.2024

Abstract

Shared micro-mobility services have swiftly become widely adopted in major urban centers globally. In particular, individuals are encouraged to transition to environmentally friendly modes of transportation to support a sustainable transportation system. For this reason, the tendencies and potential of individuals to use micro-mobility vehicles are being investigated. This paper focused on university students, analyzing their preferences for using micromobility vehicles, particularly for first-mile or last-mile trips in terms of gender and travel time variables. In the study, k-Nearest Neighbors (kNN) and Logistic Regression (LR) algorithms are used in machine learning approach and they were compared. A face-to-face survey was conducted with 150 students randomly to measure the potential use of micromobility vehicles among university students. As a result, LR model is better than kNN model according to the accuracy of the models, 0,63 and 0,43 respectively. On the other hand, 51,82% of male students and 62,50% of female students participating in our study reported that they are not inclined to prefer micromobility vehicles at any stage of their trips, and the main challenge for the potential users is safety.

Keywords: Gender, k-nearest neighbors, logistic regression, machine learning, micro-mobility.

Öz

Paylaşımlı mikro-mobilite hizmetleri, dünya genelinde özellikle büyük şehirlerde hızla benimsenmiştir. Son zamanlarda, bireylerin sürdürülebilir bir ulaşım sistemini desteklemek amacıyla çevre dostu ulaşım modlarına geçiş yapmaları teşvik edilmektedir. Bu nedenle, literatürde, yol kullanıcılarının mikro-mobilite araçlarını kullanma eğilimleri ve potansiyelleri araştırılmaktadır. Bu çalışma, üniversite öğrencilerini hedef alarak, cinsiyet ve yolculuk süresi değişkenleri açısından ilk ve son kilometre (ilk ve son adım) yolculukları için mikro-mobilite araçlarını kullanma eğilimlerini analiz etmektedir. Çalışmada, makine öğrenmesi yaklaşımıyla k-En Yakın Komşu (kNN) ve Lojistik Regresyon (LR) algoritmaları kullanılmış ve karşılaştırılmıştır. Üniversite öğrencileri arasında mikro-mobilite araçlarının potansiyel kullanımını ölçmek amacıyla 150 öğrenciyle yüz yüze anket yapılmıştır. Sonuç olarak, LR modelinin doğruluk açısından kNN modelinden (sırasıyla 0,63 ve 0,43) daha iyi olduğu görülmüştür. Öte yandan, çalışmamıza katılan erkek öğrencilerin %51,82'si ve kadın öğrencilerin %62,50'si, yolculuklarının herhangi bir aşamasında mikro-mobilite araçlarını tercih etme eğiliminde olmadıklarını belirtmiş, potansiyel kullanıcılar için ana zorluğun "güvenlik" kriteri olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Anahtar Kelimeler: Cinsiyet, k-en yakın komşu, lojistik regresyon, makine öğrenmesi, mikro-mobilite.

¹Istanbul Aydın University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, İstanbul, Türkiye.
mahmutesadergin@aydin.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-1038-3530.

1. INTRODUCTION

As cities grow rapidly, transportation demand continues to increase. As increasing travel demand brings more mobility, the issue of traffic congestion begins to emerge in cities. Traffic congestion is seen as one of the most significant problems, especially in cities with large populations and urban areas. In recent times, micro-mobility solutions have started to be preferred as a solution to traffic congestion, which brings substantial costs that can be defined as negative externalities such as time loss, fuel consumption, and air and noise pollution.

Recent transportation approaches have emerged to reduce the negative externalities of traffic and promote public transportation, particularly in self-driving vehicles and the mobility-as-a-service (MaaS) model. MaaS provides on-demand mobility via crowdsourced or privately owned vehicles, and this concept has expanded to include on-demand mobility via smaller vehicles (Sun et al., 2021). Small vehicles which can be classified as bicycles, scooters, e-bikes, e-scooters, etc. are defined as micro-mobility vehicles. Personal vehicles that are significantly lighter and smaller than cars are referred to as "micro-mobility" (Forum, 2024).

The use of micro-mobility vehicles is increasing in many countries and becoming a trend especially for increasing the use of public transportation. As it is stated that the absence of convenient first leg and last leg of travel options to access transit stops constitutes a significant obstacle for many individuals to utilize public transit (Yin et al., 2024). According to the report generated by National Association City Transportation Officials (NACTO), ridership in station-based bike-sharing systems has shown robust growth, reaching 67 million rides in 2022, a 17% increase compared to the previous year across the United States and in Canada (NACTO, 2023), and in line with a North American Bikeshare & Scootershare Association (NABSA) report, 37% of shared micro-mobility trips take the place of a car trip (NABSA, 2022). Moreover, in comparison to 2021, the growth rate of shared micro-mobility services in Europe was 39% in 2022 (Portal, n.d.). These results show that micro-mobility vehicles are considered a potential solution for traffic impact and it is considered that it can minimize the usage of private vehicles, particularly for short trips, and represent a transition toward more environmentally friendly modes of transportation (Jaber et al., 2024). In addition to becoming a trend, shared micro-mobility offers a practical substitute for conventional urban transportation (Wolnowska & Kasyk, 2024).

In literature, the 18-44 age range is generally more represented, while individuals aged 45 and above are not sufficiently represented in micro-mobility usage studies (Delbosch & Thigpen, 2024; NABSA, 2022; Roig-Costa et al., 2024). In other words, when considering age group variables, the studies predominantly include the younger population. This may be due to the younger population's ability to more easily follow developing technology and their physical advantages.

Typically, studies in literature analyze the micro-mobility usage behaviors of all users. However, as seen in these studies, micro-mobility users are generally within the younger age group. Furthermore, it is considered that the younger population's tendency to use micro-mobility will indicate the potential user base for both the present and future. On the other hand, this study generates invaluable data to the literature

which is missing especially in Türkiye. To fill this gap in the literature, this paper focused on the young population and a survey was conducted with university students, analyzing their preferences for using micro-mobility vehicles, particularly for first-mile or last-mile trips in terms of gender and travel time variables.

2. LITERATURE REVIEW

Shared micro-mobility services have swiftly become widely adopted in major urban centers globally (Reck & Axhausen, 2021). Recently, there have been numerous studies regarding micro-mobility vehicles, which are seen as a potential solution, particularly in the context of reducing the use of private cars (Li et al., 2024). These studies often provide approaches aimed at prioritizing such initiatives within cities (Adnan et al., 2019). Micro-mobility vehicles, along with their routes and connections to public transportation systems, should be considered as an integrated system. The micro-mobility system has been examined from various perspectives in the literature. Spatio-temporal travel patterns of micro-mobility (Li et al., 2024), safety of micro-mobility system (Comi et al., 2024; Ignaccolo et al., 2022; Tzouras et al., 2024), user interest and segments (Degele et al., 2018; Hensher et al., 2024), transport equity (Guan et al., 2024), defining a procedure for data collection and analysis (Dozza et al., 2022), user satisfaction (Cheng et al., 2024).

In studies found in the literature that focus on modeling the behaviors or preferences of micro-mobility users, the most significant challenge is data acquisition. To address this, many studies have collected field data using the stated preference survey method (Adnan et al., 2019; Cho & Shin, 2022; Espino, 2023; Hong et al., 2023; Sarker et al., 2024). The prevalence of stated preference survey studies suggests that there may still be a significant number of potential users for this mode of transportation that have not yet been fully identified.

The successful integration of the micro-mobility system into public transportation is seen as a potential solution to address the traffic problems experienced in major cities. In such an integration process, the primary focus should be on establishing safe routes for micro-mobility users. Safety problems are greatly decreased in small to medium-sized cities due to lower traffic congestion (Adnan et al., 2019). Once a safe route is established, the potential for private vehicle users to switch to micro-mobility options may emerge. Studies have shown that individuals are more inclined to use micro-mobility vehicles when a dedicated lane is available (Tait et al., 2022) and it is necessary to ensure the safety and comfort of road users to provide efficiency of transportation infrastructure (Zhang et al., 2023).

Studies have shown that young individuals exhibit a higher tendency to use micro-mobility vehicles compared to other age groups. Research indicates that students and individuals aged 18–30 demonstrate a greater affinity for cycling than full-time employees and those aged 31–60 (Adnan et al., 2019), a trend also observed in the findings of (Ji et al., 2017).

On the other hand, micro-mobility has been analyzed by using various modeling approach. In order to compare the user characteristics, univariate and multivariate

probit model (Reck & Axhausen, 2021), to model user satisfaction shared mobility the structural equation model (Cheng et al., 2024), logistic binary regression model to investigate the distinguishing characteristics between e-scooter and shared bike users (Roig-Costa et al., 2024), agent-based approach to model Micro-mobility trips conducted in diverse and perceived unsafe road conditions (Tzouras et al., 2024), and some machine learning algorithms which are kNN model (Campisi et al., 2024), Extreme Gradient Boosting model (Sarker et al., 2024), XGBoost-SHAP and random parameters binary logit model (Sadeghi et al., 2024).

3. EXPERIMENTAL DESIGN AND DATA

In Türkiye, the concept of micro-mobility is not yet fully understood, nor is it widely adopted as a mode of transportation. Even in large cities, the lack of adequate infrastructure makes it difficult to obtain data of sufficient size to study user behavior. As data generated or provided by private companies offering shared micro-mobility services, municipalities, and relevant ministries are not shared, new data must be collected from the field and this situation makes the data invaluable. Since the scope of this study is to examine the micro-mobility usage preferences of young individuals, university students were selected, as in previous literature studies (Espino, 2023; Özdemir, 2023). In this context, Istanbul Aydın University was chosen as the study area due to its campus, which houses approximately 40,000 domestic and international students and is located near public transportation system connection points.

As part of the study, a survey was conducted to measure the potential use of micro-mobility vehicles among university students and a face-to-face survey was conducted with 150 students randomly. To determine the sample size for this study, Cochran's formula was utilized, as it is commonly applied in cases where the population is large or considered infinite. Cochran's formula is shown in Eq.1 (Cochran, 1963).

$$n_0 = \frac{Z^2 p(1-p)}{e^2} \quad (1)$$

where n_0 minimum sample size, Z is z-value of the confidence interval, p is estimated population proportion (0,5 is used if there is no information), and e is margin of error.

The formula indicates that beyond a certain threshold, population size has minimal impact on the required minimum sample size. In this study, the sample size is deemed adequate at a 90% confidence level. Specifically, with a population of 40,000 (which is approximate), a Z -value of 1,645, and a p -value of 0,5, the minimum required sample size is calculated to be 68. Consequently, the number of surveys conducted is sufficient to meet the 90% confidence level criteria.

Given its connections to the Metrobus and bus systems, as well as its large and diverse student population, data obtained from the students are expected to better reflect the tendencies of university students in general. As shown in Figure 1, the campus area of Istanbul Aydın University and nearby public transportation connection points are

provided. The focus is particularly on the tendency of university students to choose micro-mobility vehicles for first-mile and last-mile connections. When considering the distance from the nearest public transportation connection point to the university campus (or vice versa), two different routes were observed. The walking distance from the Besyol Bus Rapid Transit (BRT) station and bus stop to the campus is 520 meters, while the walking distance from the Sefakoy BRT station to the campus is 945 meters.

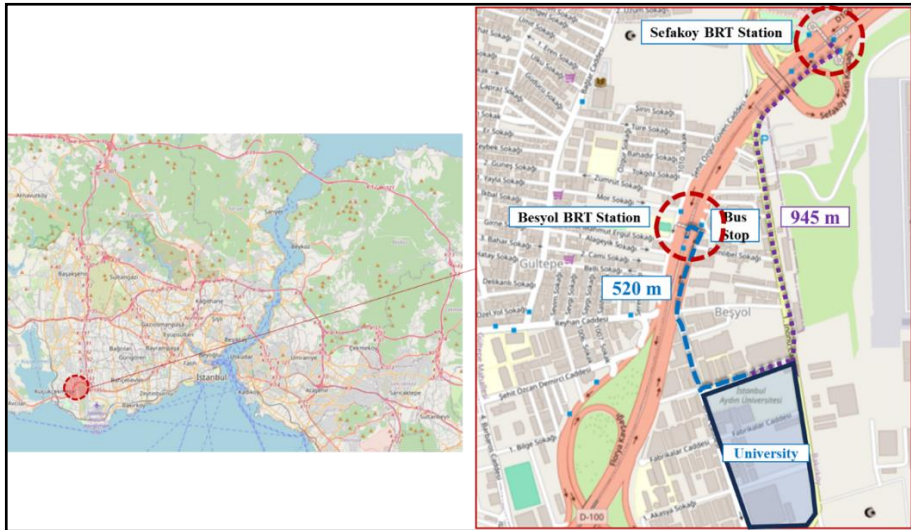


Figure 1. Study Area and Closest BRT Stations and Bus Stops

The face-to-face survey is generally composed of three main sections. The first section focuses on socio-demographic characteristics, asking individuals about their gender, age, scholarship status, income, travel time, travel cost, the number of days per week they attend university, living arrangements, and the distance from their home to the university. The second section inquires about the individuals' daily routines, or typical trips, including questions about their preferred mode of transportation, the availability of micro-mobility options for the first and last steps of their trip, and which transportation mode they choose for these steps. The third part explores the factors that are most influential in determining their micro-mobility preferences, the factors that deter them from using micro-mobility, and their likelihood of using services like Binbin, Martı, and the Bisim Smart Bicycle System under different scenarios. The survey was conducted in April 2024. During this period, the average fees of service providers operating in Istanbul, such as Binbin, Martı, and Bisim, were calculated. Accordingly, the unlock fee was determined to be 5,49 Turkish Liras (TL), and the fee per minute was 5,99 TL/min for shared e-scooter. Additionally, for Martı motorcycles, the unlock fee was 7,69 TL, and the fee per minute was also 7,69 TL. Participants were asked which of these alternatives they tended to prefer.

The descriptive statistics for the survey study are presented in Table 1. Of the students who participated in the survey, 76,67% are between the ages of 20 and 25, and 26,67% are female. The majority, 76%, are in their second, third, or fourth year of study. Nearly

half (46%), live with family members, while 22,67% live alone. A significant proportion, 73,33%, are continuing their education with a merit-based scholarship. Only 8,67% of the students have an income at or below the minimum wage in Türkiye, and the average monthly income of the students is 20,475 TL.

In the survey, students were asked whether it is possible to use micro-mobility for their first-mile trip that starts from home and ends at the nearest public transport station or car park area. 69,33% of participants responded that micro-mobility could be used for the initial phase of their trip if desired, regardless of the availability of sufficient and safe infrastructure. Similarly, 82% of participants answered "yes" to the question of whether it is possible to use micro-mobility for the last-mile trip that starts from the nearest public transit station or car park and ends at the campus.

For the home-to-campus trip, the most commonly preferred mode of transportation is public transportation, at 78%. Only 5,33% of participants commute to the university by private car, while 16,67% walk to campus. The factor most influencing students' decision to use micro-mobility was identified as safety, cited by 32,67% of respondents. Other important factors included time savings and cost-effectiveness, at 18% and 15,33%, respectively.

On average, students spend 13,29 TL per trip and travel for 40,3 minutes on their trip from home to campus. The average distance from their residence to the campus is 12,136 meters. When considering all participants, the average monthly expenditure on transportation is 578 TL.

Table 1. Descriptive Statistics of the Data

| Attributes | Levels | Number (n) | Percentage | Attributes | Levels | Number (n) | Percentage |
|---------------------------------|----------------|------------|------------|---|--|------------|------------|
| Gender | Male | 110 | 73.33% | Income Groups (TL) | < 11,700 | 13 | 8.67% |
| | Female | 40 | 26.67% | | 20,001-30,000 | 29 | 19.33% |
| Age Groups | 17-19 | 30 | 20.00% | | 30,001-40,000 | 54 | 36.00% |
| | 20-22 | 66 | 44.00% | | 40,001-50,000 | 39 | 26.00% |
| | 23-25 | 49 | 32.67% | | 50,000 > | 15 | 10.00% |
| | 26+ | 5 | 3.33% | Is it available to use micro-mobility in your first mile? (Home to campus) | No | 46 | 30.67% |
| What year in university? | 1 | 29 | 19.33% | | Yes | 104 | 69.33% |
| | 2 | 34 | 22.67% | Is it available to use micro-mobility in your last mile? (Home to campus) | No | 27 | 18.00% |
| | 3 | 41 | 27.33% | | Yes | 123 | 82.00% |
| | 4 | 39 | 26.00% | Typical Mode (Main mode) | Walking | 25 | 16.67% |
| | 5 | 7 | 4.67% | | Public Transit | 117 | 78.00% |
| Who do you live with? | Family members | 69 | 46.00% | Private Vehicle | 8 | 5.33% | |
| | Friends | 43 | 28.67% | What is the most important factor that would influence your decision to use micro-mobility vehicles? | Cost-effectiveness | 23 | 15.33% |
| | Dormitory | 4 | 2.67% | | Convenience | 16 | 10.67% |
| | Alone | 34 | 22.67% | | Environmental impact | 13 | 8.67% |
| Scholarship | 100% | 110 | 73.33% | | Safety | 49 | 32.67% |
| | 75% | 4 | 2.67% | | Availability of micro-mobility options | 17 | 11.33% |
| | 50% | 5 | 3.33% | Infrastructure (e.g., bike lanes, scooter parking) | 5 | 3.33% | |
| | 25% | 16 | 10.67% | Saving time | 27 | 18.00% | |
| | No | 15 | 10.00% | | | | |

| Attributes | Mean | St.dv. | Attributes | Mean | St.dv. |
|--------------------------|-------|--------|--|--------|--------|
| Travel Cost (TL) | 13.29 | 29.12 | Distance (Between Home - Campus) (m) | 12,136 | 7,572 |
| Travel Time (min) | 40.30 | 22.78 | Monthly Payment for Transportation (TL) | 578 | 1,500 |

4. METHODOLOGY

To identify the factors influencing university students' preferences for micro-mobility vehicles, k-Nearest Neighbors (kNN) and Logistic Regression (LR) models with machine learning were employed. Each approach in the literature has different advantages and disadvantages. In this study, kNN and LR machine learning methods were chosen because they are faster and more efficient for studies with smaller datasets. With LR, the model is easier to interpret, and with kNN, a more flexible model can be obtained by not making prior assumptions. On the other hand, approaches like Support Vector Machines, Decision Trees, or Artificial Neural Networks are also potential alternatives. However, such approaches require a large dataset. Therefore, it is considered that the most suitable approaches are kNN and LR. Following the preprocessing and organization of the survey data to fit the kNN and LR models, the dataset was randomly split into training (60%), validation (20%), and testing (20%) subsets for machine learning. The dependent variable in the machine learning process

was "preference" (i.e., whether students preferred to use micro-mobility vehicles for any part of their trip: Yes or No). Graphical analyses revealed that "gender" and "travel time" had a stronger influence on the "preference" variable, leading to their inclusion as independent variables in the machine learning models. On the other hand, the correlation between gender and travel time also tested and the value R is 0,0019.

4.1. k - Nearest Neighborhood Model (kNN)

The kNN classification algorithm, originally introduced by Cover and Hart in 1967 (Cover & Hart, 1967), is recognized for its simplicity among machine learning algorithms and is extensively applied in classification tasks due to its highly adaptable and straightforward design (Mahesh, 2019). In this method, observations are classified using the kNN algorithm based on the majority class of the 'k' closest neighbors within the feature space (Alrefaei & Ilyas, 2024). Generally Euclidian algorithm is used to find the nearest point in this method (Cunningham & Delany, 2021). The kNN classifier categorizes a query by assigning it to the class that is most commonly represented among its k-nearest neighbors in the training set, based on the majority voting principle (Uddin et al., 2022; Wang et al., 2022). The kNN classifier requires calculating the distance between the input sample and each individual sample in the training dataset. (Gallego et al., 2018).

The kNN classifier first calculates the Euclidean distances $d_{(x, y_i)}$ between the test sample x and each training sample y_i which is element of training set. Next, the kNNs of x are identified and sorted in ascending order based on their Euclidean distances (Wang et al., 2020). The Euclidean distances is calculated as in Eq. 2.

$$d(x, y_i) = \sqrt{(x - y_i)^T(x - y_i)}, \quad i > 0 \quad (2)$$

Lastly, the test sample x is classified into class ω_C based on a majority voting process, as expressed in Eq.3 (Trevor, Hastie; Tibshirani, Robert; Friedman, 2019; Wang et al., 2020).

$$\omega_C = \underset{\omega_j}{\operatorname{argmax}} \sum_{(y_i^{NN}, c_i^{NN}) \in NN_k^{Tr}(x)} \delta(\omega_j = c_i^{NN}), \quad j > 0 \quad (3)$$

$\delta(\omega_j = c_i^{NN})$ is the Kronecker delta function. It takes "1" if $\omega_j = c_i^{NN}$ or "0" otherwise. "j" is the number of classes, Tr presents the training samples, c_i corresponds class label of y_i and $c_i \in \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M\}$, NN specifies nearest neighbor.

4.2. Logistic Regression Model (LR)

LR is a widely used statistical model designed for analyzing categorical data with a binary dependent variable (Regulski et al., 2024). This classification method estimates the likelihood of an outcome falling into one of two categories based on independent variables, such as a rolling median and time (Regulski et al., 2024; Rymarczyk et al., 2019). LR is also recognized as a statistical approach within the domain of machine learning (Maalouf, 2011; Rymarczyk et al., 2019). The LR model employs a sigmoid function to map real-valued independent variables to a range between 0 and 1, thereby

converting the continuous output from a linear regression into a categorical output (Geeksforggeeks, 2024). LR works as follow:

X s are independent input features, and they are stored in a matrix. Y represents the dependent variable which is binary coded. The independent and dependent variables are shown in Eq. 4.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} \dots x_{1m} \\ x_{21} \dots x_{2m} \\ \dots \dots \dots \\ x_{n1} \dots x_{nm} \end{bmatrix} \text{ and } Y = \begin{cases} 0 \text{ if Class 1} \\ 1 \text{ if Class 2} \end{cases} \quad (4)$$

After that, in LR model the multi-linear function to input variables X is applied by using Eq.5.

$$Y = a \cdot X + b \quad (5)$$

Here Y is dependent variable and it can be defined as the preference of choosing micro-mobility vehicle or not. Since the dependent variable "preference" binary coded, there will be two functions and each of " $Y_{preference}$ " functions can be named as "*utility function*" of the "*prefer*" and "*not prefer*" options. " a " is the coefficient of independent variable and " b " is bias term which is also known as intercept. As it is stated that LR employs the Sigmoid function to estimate the probability that the dependent variable belongs to a specific class, which converts any continuous variable into a value between 0 and 1. In the binary logit model, the likelihood that preference 1 will be picked is given by the preference set, which includes "prefer (which is coded "1")" and "not prefer (which is coded "0")" (Ergin & Tezcan, 2022).

$$P_1 = \frac{e^{a_1 \cdot X_1 + b_1}}{e^{a_1 \cdot X_1 + b_1} + e^{a_2 \cdot X_2 + b_2}}, \quad \text{and} \quad P_2 = 1 - P_1 \quad (6)$$

In the Eq. 6, P_1 represents the probability of selecting choice 1, $(a_1 \cdot X_1 + b_1)$ represents the utility functions of alternatives 1 and 2.

5. MODEL ESTIMATION RESULTS

In the machine learning-based kNN and LR models, the dependent variable "preference," indicating whether individuals would choose micro-mobility vehicles at any stage of their trip under suitable conditions, was used alongside the independent variables "gender" and "travel time." The same variables were applied to both models (kNN and LR). For the kNN model, it is necessary to determine the number of classes, which was done using the Elbow method (Figure 2). In this figure, Within-Cluster Sum of Squares (WCSS) acts as an indicator of the error or variability within clusters. It shows how closely data points are positioned within a cluster, highlighting the compactness and uniformity of the clusters. Accordingly, the optimal number of neighbors was determined to be 3, and the analyses were conducted based on this selection.

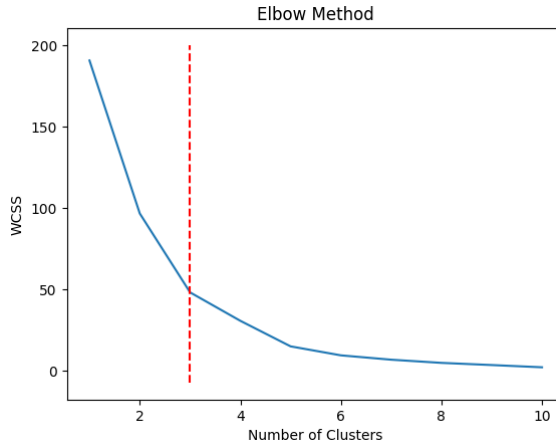


Figure 2. Elbow Method Result

As part of the machine learning process, the KNeighborsClassifier and LogisticRegression algorithms, which are included in the open-source machine learning library scikit-learn, were utilized (Scikit-learn, n.d.-a, n.d.-b). Model results are given in Table 2.

Table 2. kNN and LR Model Results

| Sentiments | kNN Model Result | | | | LR Model Result | | | |
|----------------------------|------------------|-------------|----------|---------|-----------------|-------------|----------|---------|
| | Precision | Recall | F1-score | Support | Precision | Recall | F1-score | Support |
| 0 | 0.5 | 0.29 | 0.37 | 17 | 0.75 | 0.53 | 0.62 | 17 |
| 1 | 0.4 | 0.62 | 0.48 | 13 | 0.56 | 0.77 | 0.65 | 13 |
| Evaluation Measures | | | | | | | | |
| accuracy | | | 0.43 | 30 | | | 0.63 | 30 |
| macro avg | 0.45 | 0.45 | 0.43 | 30 | 0.65 | 0.65 | 0.63 | 30 |
| weighted avg | 0.46 | 0.43 | 0.42 | 30 | 0.67 | 0.63 | 0.63 | 30 |

The model results are compared based on precision, recall, and F1-score metrics. Precision evaluates the accuracy of positive predictions by determining how many of the predicted positives are truly positive, with higher precision indicating fewer false positives. When examining the precision values, the LR model's results (0,75; 0,56) are significantly better than those of the kNN model (0,5; 0,4). On the other hand, recall measures the model's ability to identify all true positive events, with higher recall indicating fewer false negatives. In this assessment, the LR model also outperforms the kNN model, with recall values of (0,53; 0,77) compared to (0,29; 0,62) for kNN. The F1-Score offers a comprehensive metric by balancing both precision and recall, making it especially valuable in situations with imbalanced class distributions. The superiority of the LR model over the kNN model is further evident in the F1-score. Additionally, the accuracy rate of the LR model (0,63) is better than that of the kNN model (0,43).

6. DISCUSSION AND CONCLUSION

This study aims to identify the factors influencing the use of micro-mobility vehicles, with a particular focus on the effects of gender and travel time variables. Shared micro-mobility vehicles are especially preferred by the younger population, which is why research in the literature has often focused on the preferences of university students (Özdemir, 2023) or examined the status of being a university student (Hong et al., 2023). In parallel to this study, it is found that younger individuals, particularly students in universities, are more inclined to cycle compared to older adults and full-time employees (Adnan et al., 2019).

Some studies claim that e-scooters provide a faster, cost-effective, and environmentally friendly alternative to walking and driving, with easier accessibility than taxis, and are especially popular among young people for short-distance travel (Özdemir, 2023). However, in cities with high population density such as Istanbul, where infrastructure services are insufficient for the use of micro-mobility vehicles, their usage is quite dangerous. Consequently, 51,82% of male students and 62,50% of female students participating in our study reported that they are not inclined to prefer micro-mobility vehicles at any stage of their trips. Similarly, the literature indicates that micro-mobility is not exclusively favored by low-income individuals or students as a mode of transportation (Campisi et al., 2024). The primary factor causing the lack of preference for micro-mobility vehicles among university students is "safety." For 36% of male students and 35% of female students, "safety" was reported as the most important factor. Likewise, Wolnowska and Kasyk (2024) stated that the student group is closely linked to the perception that cycling is highly unsafe (Wolnowska & Kasyk, 2024).

In the literature, there are studies that examine the tendencies of young individuals to prefer micro-mobility vehicles through various independent variables. In these studies, latent variable model and error component model (Hong et al., 2023), logit model (Cho & Shin, 2022), hybrid choice model (Adnan et al., 2019), multilevel linear mixed effects model (Cubells et al., 2023) and so on are used. In this study, LR model and kNN model results are compared in order to show the performance of the models in terms of gender and travel time independent variables which are used to train the dataset. In accordance with the model results, it can be obviously claimed that the LR model generally outperforms the kNN model. Particularly, the high recall and F1-score values in the "would prefer" category indicate that this model better identifies this class and minimizes the number of false negatives. Given that the independent variables, gender and travel time, are included in the data used to train these models, it can be said that these variables are more influential in the LR model. This, in turn, has contributed to the model making more accurate predictions.

Current technological advancements allow for a deeper analysis of the data obtained. Therefore, in this study, the dataset was trained using the independent variables of gender and travel time, and the effects of gender and travel time were observed more strongly. Since the results of models obtained using different variables were quite low, only the independent variables of gender and travel time were considered.

The study also has some limitations. More comprehensive analyses can be conducted once these limitations are addressed. Although the study focuses on students, it could

also analyze larger datasets based on students' income levels, scholarship status, and the geographic locations of their homes relative to the university. Additionally, overcoming these limitations may enable more detailed analyses in future studies using different methods, potentially shorter surveys, and larger sample sizes.

As a result, increasing the use of micro-mobility vehicles as an environmentally friendly mode of transportation is essential for a cleaner future and sustainability. Hence, it is necessary to implement geometric arrangements in urban areas to specifically address safety issues and to provide a good price-performance ratio service that encourages the use of micro-mobility vehicles. Geometric arrangement, education, legal rights, and supervision could lead to the acceptance of micro-mobility vehicles as a mode of transportation and increase their preference rate. Following the adoption of this usage as a behavior, a cultural change will also be experienced. Studies have shown that young individuals are more inclined to use micro-mobility vehicles compared to other age groups. Therefore, targeting young individuals as the primary focus of strategies aimed at promoting the widespread use of micro-mobility in society would be a more effective approach.

Research and Publication Ethics Statement

Research and publication ethics have been complied with in the study conducted.

REFERENCES

- Adnan, M., Altaf, S., Bellemans, T., Yasar, A.-H., & Shakshuki, E. M. (2019). Last-mile travel and bicycle sharing system in small/medium sized cities: user's preferences investigation using hybrid choice model. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(12), 4721–4731. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0849-5>
- Alrefaei, A., & Ilyas, M. (2024). Using Machine Learning Multiclass Classification Technique to Detect IoT Attacks in Real Time. *Sensors*, 24(14). <https://doi.org/10.3390/s24144516>
- Campisi, T., Kuşkan, E., Çodur, M. Y., & Dissanayake, D. (2024). Exploring the influence of socio-economic aspects on the use of electric scooters using machine learning applications: A case study in the city of Palermo. *Research in Transportation Business & Management*, 56, 101172. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2024.101172>
- Cheng, W., Yang, J., Wu, X., Zhang, T., & Yin, Z. (2024). A Quantitative Study on Factors Influencing User Satisfaction of Micro-Mobility in China in the Post-Sharing Era. *Sustainability*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/su16041637>
- Cho, S.-H., & Shin, D. (2022). Estimation of Route Choice Behaviors of Bike-Sharing Users as First- and Last-mile Trips for Introduction of Mobility-as-a-Service (MaaS). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(7), 3102–3113. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-0802-1>

- Cochran, W.G. (1963). *Sampling Techniques* (3rd ed.), 75. *John Wiley and Sons, Inc.*
- Comi, A., Hriekova, O., & Nigro, M. (2024). Exploring road safety in the era of micro-mobility: evidence from Rome. *Transportation Research Procedia*, 78, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.008>
- 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>
- Cubells, J., Miralles-Guasch, C., & Marquet, O. (2023). Gendered travel behaviour in micromobility? Travel speed and route choice through the lens of intersecting identities. *Journal of Transport Geography*, 106, 103502. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103502>
- Cunningham, P., & Delany, S. J. (2021). k-Nearest Neighbour Classifiers - A Tutorial. *ACM Comput. Surv.*, 54(6). <https://doi.org/10.1145/3459665>
- Degele, J., Gorr, A., Haas, K., Kormann, D., Krauss, S., Lipinski, P., Tenbih, M., Koppenhoefer, C., Fauser, J., & Hertweck, D. (2018). Identifying E-Scooter Sharing Customer Segments Using Clustering. *2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436288>
- Delbosc, A., & Thigpen, C. (2024). Who uses subsidized micromobility, and why? Understanding low-income riders in three countries. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, 2, 100016. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2024.100016>
- Dozza, M., Violin, A., & Rasch, A. (2022). A data-driven framework for the safe integration of micro-mobility into the transport system: Comparing bicycles and e-scooters in field trials. *Journal of Safety Research*, 81, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.01.007>
- Ergin, M. E., & Tezcan, H. O. (2022). Joint Logit Model Approach to Analyze Soccer Spectators' Arrival Time and Location Preferences for Interim Activities in Istanbul. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 35(4). <https://doi.org/10.5829/IJE.2022.35.04A.01>
- Espino, R. (2023). Identifying Latent Variables for Active Cycling Mobility. An Application for University Students. *Transportation Research Procedia*, 71, 140–147. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.068>
- Forum, I. T. (2024). *Safer Micromobility*. 129. <https://doi.org/10.1787/0d2e0dd5-en>
- Gallego, A.-J., Calvo-Zaragoza, J., Valero-Mas, J. J., & Rico-Juan, J. R. (2018). Clustering-based k-nearest neighbor classification for large-scale data with neural codes representation. *Pattern Recognition*, 74, 531–543. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2017.09.038>

- Geeksforgeeks. (2024). *Logistic Regression in Machine Learning*. Retrieved September 1, 2024 from <https://www.geeksforgeeks.org/understanding-logistic-regression/>
- Guan, X., van Lierop, D., An, Z., Heinen, E., & Ettema, D. (2024). Shared micromobility and transport equity: A case study of three European countries. *Cities*, *153*, 105298. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105298>
- Hensher, D. A., Wei, E., Liu, W., & Balbontin, C. (2024). Profiling future passenger transport initiatives to identify the growing role of active and micro-mobility modes. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *187*, 104172. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104172>
- Hong, D., Jang, S., & Lee, C. (2023). Investigation of shared micromobility preference for last-mile travel on shared parking lots in city center. *Travel Behaviour and Society*, *30*, 163–177. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2022.09.002>
- Ignaccolo, M., Inturri, G., Cocuzza, E., Giuffrida, N., Le Pira, M., & Torrisi, V. (2022). Developing micromobility in urban areas: network planning criteria for e-scooters and electric micromobility devices. *Transportation Research Procedia*, *60*, 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.12.058>
- Jaber, A., Ashqar, H., & Csonka, B. (2024). Determining the Location of Shared Electric Micro-Mobility Stations in Urban Environment. *Urban Science* *8*(2). <https://doi.org/10.3390/urbansci8020064>
- Ji, Y., Fan, Y., Ermagun, A., Cao, X., Wang, W., & Das, K. (2017). Public bicycle as a feeder mode to rail transit in China: The role of gender, age, income, trip purpose, and bicycle theft experience. *International Journal of Sustainable Transportation*, *11*(4), 308–317. <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1253802>
- Li, Q., Zhang, E., Luca, D., & Fuerst, F. (2024). The travel pattern difference in dockless micro-mobility: Shared e-bikes versus shared bikes. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *130*, 104179. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104179>
- Maalouf, M. (2011). Logistic regression in data analysis: an overview. *International Journal of Data Analysis Techniques and Strategies*, *3*(3), 281–299. <https://doi.org/10.1504/IJDATS.2011.041335>
- Mahesh, B. (2019). Machine Learning Algorithms -A Review. In *International Journal of Science and Research (IJSR)*, *9*. <https://doi.org/10.21275/ART20203995>
- NABSA. (2022). *4th Annual Shared Micromobility State of the Industry Report*. <https://doi.org/10.7922/G20R9MRM>
- NACTO. (2023). *Shared Micromobility in the U.S. and CANADA*. Retrieved September 1, 2024 from <https://nacto.org/publication/shared-micromobility-in-2022/>

- Özdemir, P. (2023). University students; perspectives on micromobility: An evaluation based on e-scooters TT - Üniversite öğrencilerinin mikromobiliteye bakış açıları: E-scooterlar açısından bir değerlendirme. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 6(2), 223–237. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1257000>
- Portal, M. (n.d.). *Mobility Portal Europe*. Retrieved July 30, 2024, from <https://mobilityportal.eu/270-million-users-chose-to-use-shared-micromobility-services-in-europe/#:~:text=While the demand for shared,by 17.7%25 compared to 2021.>
- Reck, D. J., & Axhausen, K. W. (2021). Who uses shared micro-mobility services? Empirical evidence from Zurich, Switzerland. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94, 102803. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102803>
- Regulski, K., Opaliński, A., Swadźba, J., Sitkowski, P., Wąsowicz, P., & Kwietniewska-Śmietana, A. (2024). Machine Learning Prediction Techniques in the Optimization of Diagnostic Laboratories' Network Operations. In *Applied Sciences*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/app14062429>
- Roig-Costa, O., Miralles-Guasch, C., & Marquet, O. (2024). Shared bikes vs. private e-scooters. Understanding patterns of use and demand in a policy-constrained micromobility environment. *Transport Policy*, 146, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.11.010>
- Rymarczyk, T., Kozłowski, E., Kłosowski, G., & Niderla, K. (2019). Logistic Regression for Machine Learning in Process Tomography. *Sensors*, 19(15). <https://doi.org/10.3390/s19153400>
- Sadeghi, M., Aghabayk, K., & Quddus, M. (2024). A hybrid Machine learning and statistical modeling approach for analyzing the crash severity of mobility scooter users considering temporal instability. *Accident Analysis & Prevention*, 206, 107696. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107696>
- Sarker, M. A. A., Asgari, H., Chowdhury, A. Z., & Jin, X. (2024). Exploring Micromobility Choice Behavior across Different Mode Users Using Machine Learning Methods. *Multimodal Transportation*, 100167. <https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100167>
- Scikit-learn. (n.d.-a). *KNeighborsClassifier*. Retrieved September 1, 2024 from <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.neighbors.KNeighborsClassifier.html>
- Scikit-learn. (n.d.-b). *LogisticRegression*. Retrieved September 1, 2024 from https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html

- Sun, B., Garikapati, V., Wilson, A., & Duvall, A. (2021). Estimating energy bounds for adoption of shared micromobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *100*, 103012. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103012>
- Tait, C., Beecham, R., Lovelace, R., & Barber, S. (2022). Is cycling infrastructure in London safe and equitable? Evidence from the cycling infrastructure database. *Journal of Transport & Health*, *26*, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2022.101369>
- Trevor, Hastie; Tibshirani, Robert; Friedman, J. (2019). *The Elements of Statistical Learning* (2nd Ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
- Tzouras, P. G., Mitropoulos, L., Karolemeas, C., Stravropoulou, E., Vlahogianni, E. I., & Kepaptsoglou, K. (2024). Agent-based simulation model of micro-mobility trips in heterogeneous and perceived unsafe road environments. *Journal of Cycling and Micromobility Research*, *2*, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.jcmr.2024.100042>
- Uddin, S., Haque, I., Lu, H., Moni, M. A., & Gide, E. (2022). Comparative performance analysis of K-nearest neighbour (KNN) algorithm and its different variants for disease prediction. *Scientific Reports*, *12*(1), 6256. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10358-x>
- Wang, Y., Pan, Z., & Dong, J. (2022). A new two-layer nearest neighbor selection method for kNN classifier. *Knowledge-Based Systems*, *235*, 107604. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107604>
- Wang, Y., Pan, Z., & Pan, Y. (2020). A Training Data Set Cleaning Method by Classification Ability Ranking for the k-Nearest Neighbor Classifier. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, *31*(5), 1544–1556. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2920864>
- Wolnowska, A. E., & Kasyk, L. (2024). Study of the Demand for Ecological Means of Transport in Micromobility: A Case of Bikeshearing in Szczecin, Poland. *Sustainability*, *16*(9). <https://doi.org/10.3390/su16093620>
- Yin, Z., Rybarczyk, G., Zheng, A., Su, L., Sun, B., & Yan, X. (2024). Shared micromobility as a first- and last-mile transit solution? Spatiotemporal insights from a novel dataset. *Journal of Transport Geography*, *114*, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103778>
- Zhang, C., Du, B., Zheng, Z., & Shen, J. (2023). Space sharing between pedestrians and micro-mobility vehicles: A systematic review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *116*, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103629>



BALIKESİR İLİ YÖRESEL GIDA ÜRÜNÜ “SAVAŞTEPE SARIBEYLER SEFERBERLİK ÇÖREĞİ” YAPIMI VE BAZI KİMYASAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF SOME CHEMICAL PROPERTIES OF "SAVAŞTEPE SARIBEYLER SEFERBERLİK ÇÖREĞİ", A LOCAL FOOD PRODUCT IN BALIKESİR PROVINCE

Yavuz YÜKSEL¹

Mustafa KIRALAN²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1576895>

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
yavuzyuksele@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
31.10.2024

Revizyon Tarihi
(Revised)
07.11.2024

Kabul Tarihi
(Accepted)
21.11.2024

Öz

“Türkiye’yi Doyuran İl” olarak isim yapmış Balıkesir, gıda çeşitliliği konusunda Türkiye’de önde gelen illerimizden bir tanesidir. Balıkesir ili ve ilçelerinde üretilen birçok yöresel yiyecek türüne ait tanıtım faaliyetleri gündün güne artmaktadır. Bu çalışmada coğrafi işaret tescilli olan Balıkesir ili yöresel ürünlerinden Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği araştırılmıştır. Bu araştırma ile Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği için standart üretim metodu oluşturulmuş, bazı kimyasal özellikleri incelenmiş ve diğer ekme çeşitleri ile karşılaştırılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları, üretilen Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği’nin “Türk Gıda Kodeksi Ekme ve Ekme Çeşitleri Tebliği” nde belirtilen limitlere uygun içeriğe sahip olduğunu göstermiştir. Nem, asitlik, kül, pH ve tuz değerleri ortalamaları sırasıyla %36,3, %4,97, 1,089, 5,77, ve %1,26 olarak belirlenmiştir. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapım metodu incelendiğinde ekşi hamur metodu ile yapılan ekme yapım metodlarıyla benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği gibi yöresel ürünlerin literatüre kazandırılması sayesinde tüketicilerin daha besleyici ekme türlerine olan ilgisinin daha da artacağı varsayılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği, Balıkesir, yöresel gıda ürünü, ekme.

Abstract

Balıkesir, known as the ‘Province that Feeds Turkey’, is one of the leading provinces in Turkey in terms of food diversity. Promotional activities for many local food types produced in Balıkesir province and its districts are increasing day by day. In this study, Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği, one of the local products of Balıkesir province with a geographical indication registration, was investigated. With this research, a standard production method was created for Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği, some of its chemical properties were examined and compared with other types of bread. Chemical analysis results showed that the produced Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği has a content that complies with the limits specified in the “Türk Gıda Kodeksi Ekme ve Ekme Çeşitleri Tebliği”. The average values of moisture, acidity, ash, pH and salt were determined as 36,3%, 4,97%, 1,089, 5,77, and 1,26%, respectively. When the Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği making method was examined, it was determined that it was similar to the sourdough bread making methods. It is assumed that thanks to the introduction of local products such as Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği into the literature, consumers’ interest in more nutritious bread products will increase even more.

Keywords: Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği, Balıkesir, local food product, bread.

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye. yavuzyuksele@balikesir.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-7960-578X.

²Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye. mustafakiralan@balikesir.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-7401-8025.

1. GİRİŞ

Ülkemiz, coğrafi konum olarak üç kıtanın birleştiği bir bölgede olması, burada uzun yıllar hüküm sürmüş bir toplum yapısının varlığı, çok fazla farklı etnik kültürü bünyesinde barındırması, endemik bitki zenginliği ve iklim koşulları gibi nedenlerle oldukça fazla yiyecek çeşitliliği potansiyeline sahiptir (Teyin, 2020; Özbek & Köşker, 2021). Bu çeşitlilik yöresel ürünlerin korunmasında coğrafi işaretin önemini ortaya koymaktadır. Balıkesir ili de bu ürün zenginliği açısından ülkemizde iyi bir konumdadır. Balıkesir ili ve ilçelerinde üretilen Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği coğrafi işaret alan yöresel ürünlerden bir tanesidir. “Mahreç İşareti” türünde coğrafi işaret tescilini 12.09.2022 tarihinde almıştır (Sarıtaş, 2023). Bu ürün Kurtuluş savaşı yıllarında askerlerin yiyecek ihtiyacını karşılamak amaçlı üretilmiş ve günümüze kadar da yapımına devam edilmiştir. Seferberlik adını bu savaş nedeniyle almıştır. Kökeni Balıkesir Savaştepe ilçesine bağlı Sarıbeyler mahallesi olsa da zamanla diğer çevre ilçelerde ve il merkezinde de üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde Balıkesir’de düğün, bayram ve özel davetlerde yerini almaktadır.

Çöreğin içeriğinde un, su, şeker, tarhana, yoğurt, zeytinyağı ve susam bulunmaktadır. Enerji ve besin öğeleri bakımından zengin özelliklere sahip olmakla birlikte yaklaşık iki ay kadar uzun bir sürede dayanıklılığını korumaktadır (Sarıtaş, 2023). Seferberlik Çöreği ismi ile anılmasına rağmen yapımı incelendiğinde ekşi mayalı ekmeğe üretilimine benzer bir yöntem ile üretildiği gözlemlenmiştir. Bir ekmeğe çeşidi olarak değerlendirilebilir.

İçerisinde bulunan tarhana ekmeğinin besleyici değerini artırmaktadır. Tarhana; laktik asit fermentasyonu sonucunda üretilen, yüksek besin değeri olan fermente bir yiyecektir (Gülbandılar ve ark., 2012; Çekal & Aslan, 2017). Tarhana kolay sindirilebilir, mineral içeriği yüksek (demir, kalsiyum, potasyum, sodyum, bakır, çinko, magnezyum gibi) ve bunun yanı sıra A ve B grubu vitaminler bakımından da oldukça zengindir. Besin değeri yoğurt, un ve diğer bileşenlerin oranlarına bağlı olarak değişiklik gösteren tarhana, ortalama %15 protein içeriğiyle yüksek proteinli ve faydalı bir besin takviyesi olarak değerlendirilmektedir (Daglioğlu, 2000; Göçmen ve ark., 2003; Ozdemir ve ark., 2007; Yıldırım & Güzeler, 2016). Yapılan bu çalışmada yöresel bir ekmeğe çeşidi olan Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği incelenmiştir. Çöreğin üretim yöntemi şematize edilmiş ve literatürde bahsi geçen benzer ürünlerle kıyaslanarak bazı kimyasal, kalitatif ve besleyici özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Böylece yıllardır tüketilen ve yakın zamanda coğrafi işaret tescili alan bu ürün hakkında elde edilen bulguların literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. MATERYAL VE METOT

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımında kullanılmak üzere Balıkesir ili Savaştepe ilçesinden Türk Gıda Kodeksi Buğday Unu Tebliği’nde (TGK, 2013a) belirtilen (nem değeri en çok %14,5, kurumaddede kül değeri %0,7<kül ≤0,8, protein miktarı en az %10,5) özelliklere uygun ekmeğe buğday unu, ekşi hamur mayası, su, tuz, kabuğu ayrılmış beyaz susam, yoğurt, zeytinyağı, beyaz toz şeker ve tarhana temin edilmiştir.

2.1. Tarhananın Hazırlanması ve Ekmek Üretimi

Ekmek yapımından öncelikle tarhana hazırlanmıştır. Tarhana yapımında sırasıyla şu işlemler gerçekleştirilmiştir. Kaynayan suya ekmeklik buğday unu ilave edilmiş ortalama 55 °C sıcaklıkta gıda üretimine uygun bir tahta kürek ile karıştırılarak pişirme işlemi (10-15 dakika) yapılmıştır. Bir kap içerisinde yoğurt ve haşlanmış nohut karıştırılarak yoğrulmuştur. Elde edilen hamur büyük parçalar halinde şekillendirilmiş ve üzeri yoğurt ile kaplanmıştır. 12 saat 21 °C oda sıcaklığında dinlendirilmiş ve sonra küçük parçalara ayrılmıştır. Temiz bir bez üzerinde oda sıcaklığında 2 saat kadar dinlendirilmiştir. Elle ovulmak suretiyle pirinç tanesi boyutuna getirilerek güneşte 1 gün süreyle kurutulmaya bırakılmıştır. Hazırlanan tarhana, ekşi hamur mayası hazırlanmadan önce 8 saat suda bekletilmiştir. Bu işlem tarhananın hamur içerisinde daha homojen dağılımı için gereklidir.

Ekşi mayalı ekmeğe üzerine bir çok araştırma bulunmaktadır (Sokmen ve ark., 2022). Ekmek üretimi Tip I ekşi mayalı ekmeğe yapım metodları revize edilerek gerçekleştirilmiştir (Corsetti & Settanni; 2007; Yıldız, 2020; Demir, 2021). Ekşi hamur mayasının hazırlanmasında su, yoğurt, ekmeklik buğday unu, zeytinyağı, şeker ve tarhana (suda bekletilmiş) karışım homojen oluncaya kadar yoğrulmuştur. Sonrasında hamur 12 saat oda sıcaklığında dinlendirilmiştir.

Ekşi hamur ve tarhana hazırlandıktan sonra Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği (ekmeği) yapımına geçilmiştir. Bunun için ekmeklik buğday unu ve su belirli oranlarda karıştırılmıştır. Daha sonra tuz ve ekşi hamur mayası ilave edildikten sonra yoğrulmuştur. Elde edilen hamur 1 saat oda sıcaklığında dinlendirilip her biri 500 gram olan bezeye bölünmüştür. Bezeler 20 dakika dinlendirildikten sonra daire şekli verilmiş üzerleri susam ile kaplanmıştır. 1 saat daha dinlendirilmiş ve odun ateşiyle yaklaşık 250 °C sıcaklıkta taş fırında 10-15 dakika arasında pişirilmiştir. Pişen Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği temiz bir bez üzerinde 1 saat kadar bekletilmiştir. Çalışmada kullanılan Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği bileşenleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği’nde Kullanılan Bileşenler

| Kullanılan bileşen | 1 adet 500 gr lık Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımı için kullanılan bileşenlerin karışımındaki oranları (%) |
|-----------------------------|--|
| Ekmeklik buğday unu | 53,6 |
| Ekşi hamur mayası | 5,4 |
| Su | 32,2 |
| Tuz | 0,21 |
| Kabuğu ayrılmış beyaz susam | 8,6 |

Ekşi hamur mayası hazırlamak için kullanılan bileşenlerin miktarı: 500 ml su, 500 g yoğurt, 2 kg ekmeklik buğday unu, 100 ml zeytinyağı, 100 g beyaz toz şeker ve 250 g (8 saat suda bekletilmiş) tarhana

Tarhana için kullanılan bileşenlerin miktarı ise 10 kg ekmeklik buğday unu, 5 kg su, 3 kg yoğurt ve 1 kg nohutur.

2.2. Kimyasal Analizler

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği kimyasal analizlerinde nem, pH, asitlik, kül ve tuz içeriği incelenmiştir. Aşağıda kimyasal analiz metotları hakkında bilgi verilmiştir.

1. Çörekte nem içeriği gravimetrik olarak AACC Method 44-01.01'e göre yapılmıştır (Elgün ve Ertugay, 2002).
2. pH ölçümü AOAC Metod no 981.12'de göre yapılmıştır (AOAC, 1998). Örnekler saf su ile seyreltilmiş (1/10) ve sonra homojen hale getirilerek pH metre cihazında ölçülmüştür.
3. Toplam titrasyon asitliği (TTA) AACC Metod no 02-31'e göre yapılmıştır (AACC, 2000; Katina, 2006). Örnekler pH ölçümündeki gibi hazırlanmış, 0.1 N NaOH çözeltisi ile titre edilmiştir. Harcanan 0.1 N NaOH miktarı büretten okunmuş ve titrasyon asitliği hesaplanmıştır.
4. Ekmek örneklerinde kül analizi, organik maddelerin yakılması ve kalan inorganik madde miktarının tespit edilmesi esasına dayalı AACC Method 08-01.01'e göre gerçekleştirilmiştir (Elgün ve Ertugay, 2002).
5. Tuz miktarı analizi, Mohr yöntemi modifiye edilerek yapılmıştır (AOAC, 2000). Öğütülmüş kuru ekmek örnekleri (1/10) saf su ile seyreltilerek süzümüştür. Süzüntü potasyum kromat indikatörü eşliğinde 0.1N AgNO₃ çözeltisi kullanılarak titre edilmiştir. Yöntemde belirtilen formül kullanılarak % tuz miktarı hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

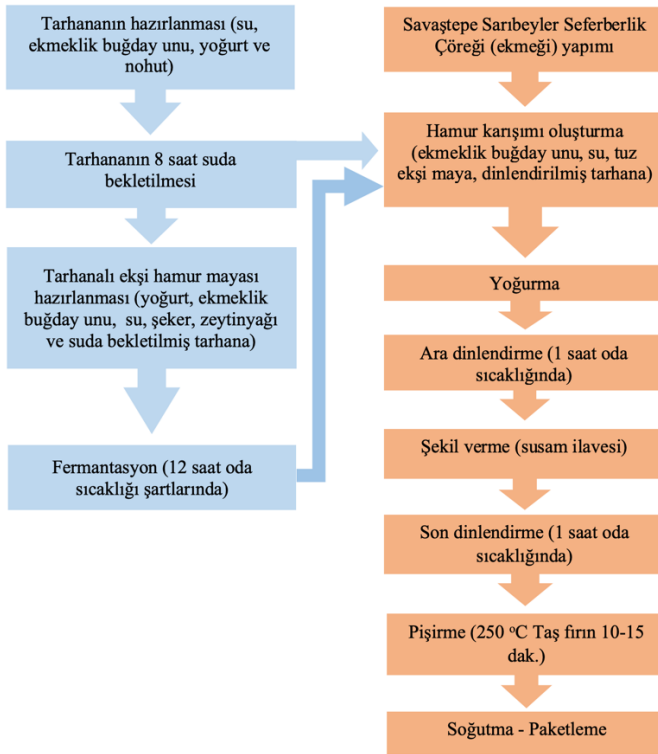
Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımı incelendiğinde indirekt hamur metodu (ekşi hamur) ile yapılan ekmek üretimine benzerlik göstermektedir. Ekmek yapımında en çok tercih edilen metot indirekt hamur metodu olarak da bilinen ekşi hamur ekmek yapım yöntemidir. Son yıllarda ekşi hamur ekmeği ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır (Durmuş, 2019; Kotancılar ve ark., 2022).

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımı incelendiğinde Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği (Tebliğ No: 2012/2) Madde 4'de belirtilen “Ekşi hamur ekmekleri” tanımına benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir (TGK, 2012). Tanımda belirtilenden farklı olarak çörek hamuru karışımında dinlendirilmiş (fermente edilmiş) tarhana kullanılmıştır.

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği' ne benzeyen bir ekmek araştırması yapılmıştır. Bu çalışmada ekmek unu ve tarhana karışımından hazırlanan hamurlara farklı oranlarda (%0, 2,5, 5, 7,25) maya ilave edilmiştir. Kontrol örneği dahil tüm ekmek karışımlarında tarhana kullanılmıştır. Yapılan ekmeklerin duyu analizi sonuçları olumlu sonuçlanmıştır. Kullanılan maya miktarı arttıkça ekmek içi özellikleri, ekmek hacmi ve duyu özelliklerinin daha iyi yönde arttığı gözlemlenmiştir (Gogus ve Aleyna, 2023). Bu çalışmadan farklı olarak Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımında tarhanalı ekşi maya kullanılmıştır. Sönmez (2023), bir araştırmasında Balıkesir ili yöresel ürünleri gastronomik olarak değerlendirilmiştir. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği'ne ait duyu analizi sonuçları kendine has tat ve lezzeti ile tüketiciler için kabul edilebilir bir beğeni kazandığını ortaya koymuştur.

Demirci (2022) yaptığı çalışmasında, tarhanayı farklı oranlarda gevrek üretiminde kullanmıştır. Tarhana oranı arttıkça gevreklerdeki fitik asit miktarının azaldığını ve gevrekteki buğday ruşeymi oranının artmasıyla ise fitik asit miktarının arttığını gözlemlemiştir. Fitik asit, insan beslenmesinde olumsuz yönleri ile bilinmektedir. Önemli minerallerle kompleks oluşturarak hem minerallerin hem de proteinlerin sindirim sistemindeki emilimlerini olumsuz yönde etkilemektedir (Bilgiçli, 2002). Fitik asit, belirli pH ve sıcaklık şartlarında fitaz enzimi sayesinde parçalanmaktadır (Bektaş, 2018). Ekşi maya fermantasyonu sonucu pH düşüşü ile fitaz aktivitesi artmakta ve hamur fitat içeriğinde %50'nin üzerinde düşüş meydana gelmektedir (Gobbetti ve ark., 2019; Babaoğlu ve ark., 2022). Bu çalışmadan yola çıkarak Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği yapımında kullanılan ekşi mayalı tarhanada fitaz aktivitesi sayesinde fitik asit miktarı üzerine olumlu etkisi olacağı ve bunun sonucunda sağlık ve beslenme yönünden ekmeğe daha da değer katacağı varsayılmaktadır.

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği üretimine ait işlem basamakları Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 2'de Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği piştikten sonraki görünümü verilmiştir.



Şekil 1. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği Üretimi İşlem Aşamaları



Şekil 2. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği

3.1. Ekmeğin Kimyasal Özellikleri

Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği kimyasal içeriğinin incelenmesinde nem, pH, asitlik, kül ve tuz içeriğine bakılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 2’ de sunulmuştur. Analizler iki paralelli olarak yapılmıştır.

Tablo 2. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği Bazı Kimyasal Analiz Sonuçları*

| Yapılan analizler | Nem | pH | Asitlik | Kül** | Tuz ** |
|-------------------|------------|----------|------------|--------------|------------|
| Ortalama | %36,3 ±0,1 | 5,77±0,0 | 4,97 ±0,02 | %1,089±0,006 | %1,26±0,02 |

*: Analizler 2 paralelli yapılmıştır.

** : Kurumaddede ölçülen değerlerdir.

“Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği” (tebliğ numarası 2012/2) Madde 5’de en çok olması gereken nem değerlerinin ekmeğe göre beyaz ekmeğe %38, tam buğday ekmeğinde %42, çavdarlı ekmeğe %43, kepekli ekmeğe %43, yulafli ekmeğe % 43 ve mısırlı ekmeğe ise % 42 olması gerektiği belirtilmiştir (TGK, 2012). Kodekste ekşi mayalı diğer ekmeğe türleri için herhangi bir nem sınırlaması yapılmamıştır. Çöreklerde bulunan nem yüzdesine bakıldığında %36,3 olduğu tespit edilmiş (Tablo 2) ve bu değerin ekmeğelerde belirlenen kodeks limitlerinin altında olduğu görülmüştür. Bu durum ekmeğe raf ömrüne olumlu yönde yansımaktadır. Yıldız ve ark. (2021), ekşi maya kullanımının ekmeğe nem değerlerini düşürdüğünü ve buna bağlı olarak da raf ömrünü artırdığını ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada ekmeğe denemelerine ait kontrol örneklerinde nem oranları %39,05 - 40,00 arasıdayken ekşi mayalı ekmeğe örneklerinde %34,65 - 37,18 aralığına düşmüş ve ekmeğin raf ömrü artmıştır (Yıldız ve ark., 2021). Ekşi mayalı ekmeğelerde yapılan diğer bir çalışmada 10 farklı fırından örnek alınmıştır. Ekşi mayalı ekmeğe örneklerindeki nem oranlarının %33,6 - 43,7 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir. Ekmeğelerde nem oranındaki düşüş ile depolama süresinin arttığı rapor edilmiştir (Gül ve ark., 2021). Bu çalışmalara paralel olarak, Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği’ndeki düşük nem içeriğinin de depolama süresine olumlu yönde etki edeceği düşünülmektedir.

Tarhana, maya ve laktik asit bakterilerinin birlikte çalışması sonucu meydana gelen organik asitler nedeniyle ekşi bir aromaya sahip fermente bir üründür. Asitlik, tarhananın bozulmadan uzun süre dayanıklı olmasında ve tüketicilerin duyuşsal olarak kabul edilebilir lezzet düzeyinde olması açısından önemlidir (Erdem, 2008). Bu nedenle, çöreklerde bulunan asitlik değeri 4,97 ve pH’nın ise 5,77 olmasının sebebinin

ilave edilen tarhanalı ekşi maya hamurundan kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Ekşi maya karışımında yer alan yoğurt ve tarhanadaki asitlik sayesinde fermantasyon süresi azalmakta, ekmeğin bayatlama süresi gecikmektedir. Bilgiçli ve ark. (2006), farklı oranlarda buğday ruşeymi ve ekmeğin buğday ununu tarhana üretiminde kullanmışlardır. Karışımlarda buğday unu miktarı azaldıkça asitlik ve pH değerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuç tarhananın, asitliği artırıcı ve pH düşürücü etkisi olduğunu ispatlamaktadır.

“Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği” (tebliğ numarası 2012/2) Madde 5’de % kül değerlerinin ekmeğin çeşidine göre beyaz ekmekte % 0,65-1,1, tam buğday ekmeğinde % 1,2-2,9, çavdarlı ekmekte % 0,7-2,5, kepekli ekmekte % 1,2-2,5, yulafli ekmekte % 0,7-1,5 ve mısırlı ekmekte ise % 1,1-2,0 aralığında olması gerektiği belirtilmiştir (TGK, 2012). Bu değerlere göre, Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği’nin ekmeklerde arzu edilen kül içeriği sınırlarında olduğu görülmektedir. Farklı ekmeğin içeriklerine ait kül içeriklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, beyaz ekmeğin kül içeriğinin yulaf ekmeği, çavdar ekmeği, kepekli ekmeğin ve tam buğday ekmeğine göre çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin düşük randımanlı unlardan yapılan ekmeklerde mineral madde miktarının önemli düzeyde azaldığından kaynaklandığı belirtilmiştir (Karaağaoğlu ve ark., 2008). Çöreklerde tespit edilen kül oranının (Tablo 2) kodekste belirtilen beyaz ekmeğin limitlerine daha yakın olduğu görülmektedir. Çöreklerde kullanılan unun düşük randımanlı ekmeğin buğday unu olması nedeniyle beyaz ekmeğe yakın sonuçlar çıkması bu durumu doğrulamaktadır.

Ekmek üretiminde tuz (NaCl) katkısı olarak sofraya tuzu, kaya tuzu veya deniz tuzu kullanılabilir. Ekmekte kullanılan tuz ürüne tat vermekte bunun yanı sıra hamurun fiziksel özelliklerini de etkilemektedir. Tuz, maya faaliyeti üzerine olumlu etkisi olmakla birlikte gluteni güçlendirerek yumuşamayı önlemektedir. Yabancı mikroorganizma gruplarının çalışmasını engelleyerek istenmeyen tat ve asitliğin oluşmasını önlemektedir. Tuz oranı %2’nin üzerine çıkması durumunda maya faaliyetini düşürerek gaz üretim gücünü azaltır ve fermantasyonu yavaşlatır (Özkaya, 2021). Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği (TGK, 2012) 'nde Değişiklik Yapılmasına Dair Tebliğ (TGK, 2013b) 'de tüm ekmeğin çeşitleri için belirlenen tuz miktarının %1,5 (kuru maddede) olması gerektiği belirtilmiştir. Ekmek yapımında çoğunlukla %1,0-1,5 oranında tuz kullanılmaktadır (Mondal & Datta, 2008; Özkaya, 2019). Yiğit ve Doğan (2010) çalışmalarında, Ağrı ilindeki 30 fırından alınan ekmeklerin % tuz değerlerini araştırmış ve sonuçların %1,02-2,43 arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Fırınların üçte birinde tuz oranları yasalarda belirtilen limitlerin üzerinde çıkmıştır. Avrupa Birliği’nin ulusal eylem planlarından biri de bazı besinlerde tuz miktarının azaltılması gerektiğine yönelik düzenlemelerdir. İnsan sağlığı açısından risk oluşturan yüksek tuz kullanımını bazı ürünlerde düşürülmüştür. Bunlardan bir tanesi de ekmeğin (Grubu, 2016). Ülkemizde Tarım ve Orman Bakanlığı Gıda Kontrol Genel Müdürlüğü de başta ekmeğin olmak üzere pastırma, peynir, salça, gibi birçok gıdada tuz içeriğine yönelik düzenlemeler yapmıştır. Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği’nin (Tebliğ No:2012/2) yürürlüğe girmesi ile ekmeklerin kuru maddesindeki tuz miktarı %2,5 veya 2,0 g’dan 1,5 g’a azaltılmıştır (TGK, 2013b). Araştırmacılara göre dünyada kişi başına tüketilen tuz miktarının önerilen düzeye düşürülmesiyle her yıl yaklaşık 2.5 milyon insanın ölümünün engellenebileceğini varsayılmıştır (Grubu, 2016). İşlenmiş gıdalarda (peynir, ekmeğin, zeytin vb.) tuzun daha da azaltılması, bilinçli toplumun katkısı ve gıda etiketlerinde daha detaylı bilgi

paylaşımı sağlığın korunmasında önemli faydalar sağlayacaktır (Gillespie ve ark., 2015). Tuz kullanımını azaltmaya yönelik politikalar giderek artmaktadır. Devlet politikası olarak gerçekleştirilen yasal sınırlamalar (ekmekte tuz miktarını düşürmek gibi) daha başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır (Wilson ve ark., 2015; Öztürk ve Garipağaoğlu, 2018). Yüksek tuz kullanımının hipertansiyon, kemik erimesi, inme ve mide kanseri gibi sağlık sorunlarına neden olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği (ekmeği) incelendiğinde (Tablo 2) tuz içeriğinin %1,26 olduğu ve bu sonucun yasal sınırların altında olması nedeniyle tüketim açısından uygun bir ekmeğin ürünü olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Balıkesir ili ekmeğin çeşitlerinden biri olan Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği coğrafi işaret olarak tüketime uygun bir gıda olarak üretimine devam edilmektedir. Çanakkale ve Kurtuluş savaşlarından itibaren günümüze kadar yöre halkı tarafından günlük diyetlerde yerini almıştır. Günlük beslenmemizde tükettiğimiz gıdaların en başında olan ekmeğin, besince oldukça zengin fermente gıdalardan olan tarhana ile hazırlanarak duyu ve yapısal özellikleri farklı olan bir ürün haline dönüştürülmüştür. Çalışmada üretilen ekmeğin üretim metodu ve tüketime uygun olup olmadığı kimyasal analizlerle tespit edilmiş ve yasal sınırlamalara uygun olup olmadığı incelenmiştir. Savaştepe Sarıbeyler Seferberlik Çöreği bölgede üstün bir tat ve aromaya sahip, geç bayatlayan bir ekmeğin olarak bilinmektedir. Ekşi mayalı olması ve tarhananın çöreğin karışımında kullanılması hem lezzetini hem de raf ömrünü artırıcı bir fayda sağlamaktadır. Kimyasal içerik olarak incelendiğinde Türk Gıda Kodeksi yasal sınırlarına uyumlu bir içerikte olduğu tespit edilmiştir. Yapım metodu olarak değerlendirildiğinde ekşi mayalı hamur yapım metodlarına benzer bir üretimi olduğu gözlemlenmiştir. Diğer ekşi mayalı ekmeğlerden farklılığının ekşi mayada kullanılan formülasyondan ve fermantasyon sürelerinden kaynaklandığı belirlenmiştir. Ekmeğin bileşiminde kullanılan ekşi maya için formülasyonda, yöreye has nohutla hazırlanmış tarhananın ekşi mayalı hamuru kullanılmaktadır. Ülkemizde besince zengin içeriğe sahip birçok ekmeğin bulunmaktadır. Üretilen bu ekmeğlerin pazara kazandırılması ve besin içeriklerinin incelenmesine yönelik araştırmaların hızlanması, marka değeri oluşturulması açısından yöresel ürünlerde coğrafi işaret tescil çalışmalarının daha da artırılması önerilmektedir.

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

- AACC, (2000). International, Method 02-31, Approved methods of the AACC, 10th ed. St. Paul, MN: *American Association of Cereal Chemists*.
- AOAC, (1998). (Official Methods of Analysis), 13th ed. Official method 981.12. pH of acidified foods. Association of Official Analytical Chemists, International Washington D.C.
- AOAC, (2000). Official Methods of Analyses, *Association of Official Analytical Chemists*, 17th edition, Washington, DC.
- Babaoğlu, H. Ç., Akın, N., & Özkaya, B. (2022). Effects of Dephytinized Wheat Bran on Rheological Properties of Dough and Sourdough Fermentation. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 36(1), 91-97. DOI:10.15316/SJAFS.2022.013
- Bektaş, M. (2018). *Farklı proses koşullarının bazı tahıl ve baklagillerdeki fitik asit düzeyi ve biyoyararlanım üzerindeki etkilerinin araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.
- Bilgiçli, N. (2002). Fitik Asitin Beslenme Açısından Önemi ve Fitik Asit Miktarı Düşürülmüş Gıda Üretim Metotları, *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 16 (30), 79-83.
- Bilgiçli, N., Elgün, A., Herken, E. N., Ertaş, N., & İbanog˘lu, Ş. (2006). Effect of wheat germ/bran addition on the chemical, nutritional and sensory quality of tarhana, a fermented wheat flour-yoghurt product. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 680-686. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2005.07.030
- Corsetti, A., & Settanni, L. (2007). Lactobacilli in sourdough fermentation. *Food research international*, 40(5), 539-558. DOI: 10.1016/j.foodres.2006.11.001
- Çekal, N., & Aslan, B. (2017). Gastronomik bir değer olarak tarhana ve coğrafi işaretlemeye tarhananın yeri ve önemi. *Güncel Turizm Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 124-135.
- Daglioğlu, O. (2000). Tarhana as a traditional Turkish fermented cereal food. Its recipe, production and composition. *Food/Nahrung*, 44(2), 85-88. DOI:10.1002/(SICI)1521-3803(20000301)44:2<85::AID-FOOD85>3.0.CO;2-H
- Demir, Y. (2021). Geleneksel ekşi mayanın sağlık ve ekmek üzerindeki etkileri. *Aydın Gastronomy*, 5(1), 63-70.
- Demirci, Ş. (2022). *Buğday ruşeymi ve tarhana ilavesiyle fonksiyonel ve besleyici özellikleri geliştirilmiş gevrek üretimi üzerine bir araştırma* [Yüksek Lisans Tezi]. Necmettin Erbakan University, Türkiye.

- Durmuş, Y. (2019). *Fındık Zarı ve Modifiye Nişasta İlavesinin Ekşi Hamur Reolojisi, Ekmek Kalitesi ve Sindirilebilirlik Üzerine Etkileri* [Doktora Tezi], Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Elgün, A., & Ertugay Z. (2002). Tahıl İşleme Teknolojisi. *A. Ü. Yayınları* No:78 Ziraat Fakültesi No:297, Ders Kitapları Serisi No: 52, 201-343, Erzurum, Türkiye.
- Erdem, E. (2008). *Tarhana üretiminde balık etinin kullanımı* [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gillespie, D. O., Allen, K., Guzman-Castillo, M., Bandosz, P., Moreira, P., McGill, R., Anwar, E. Lloyd-Williams, F. Bromley, H. Diggle, P. J. Capewell, S. & O'Flaherty, M. (2015). The health equity and effectiveness of policy options to reduce dietary salt intake in England: policy forecast. *PLoS One*, 10(7), e0127927. DOI: 10.1371/journal.pone.0127927
- Gobbetti, M., De Angelis, M., Di Cagno, R., Calasso, M., Archetti, G., & Rizzello, C. G. (2019). Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation. *International journal of food microbiology*, 302, 103-113. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.05.018
- Gogus, N., & Gün, A. (2023). Tarhana hamurundan üretilen ekmeklerin duyuşal özelliklerinin değerlendirilmesi. *Aydın Gastronomy*, 7(1), 1-13.
- Göçmen, D., Gürbüz, O., & Şahin, İ. (2003). Hazır tarhana çorbaları üzerinde bir araştırma. *Gıda*, 28(1).
- Grubu, E. (2016). Tuz Tüketimi ve Sağlık. *Beslenme ve Diyet Dergisi*, 44(3), 194-195.
- Gül, H., Acun, S., Hayıt, F., & Şirikçi, B. S. (2021). Geleneksel Ekşi Mayalı Isparta Ekmeğinin Bazı Kalite Karakteristikleri Açısından Değerlendirilmesi. *Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16(1), 34-45.
- Gülbandılar, A., Dönmez, M., Cankurtaran, M., & Çeliközlü, S. (2012). Gediz Tarhanasının Kimyasal, Mikrobiyolojik ve Duyusal Özelliklerinin Değerlendirilmesi, Türkiye 11. *Gıda Kongresi*, 10-12.
- Karaağaoğlu, N., Karabudak, E., Yavuz, S., Yüksek, O., Dinçer, D., Tosunbayraktar, G., & Eren, F. H. (2008). Çeşitli ekmeklerin protein, yağ, nem, kül, karbonhidrat ve enerji değerleri. *Gıda*, 33(1), 19-25.
- Katina, K., Salmenkallio-Marttila, M., Partanen, R., Forssell, P., & Autio, K. (2006). Effects of sourdough and enzymes on staling of high-fibre wheat bread. *LWT-Food Science and Technology*, 39(5), 479-491.
- Kotancılar, H. G., Yakar, T., & Karaoğlu, M. M. (2022). Ekşi hamur ve buğday, çavdar, yulaf tam unu katkı ekmeklerin kalitatif özellikleri. *ATA-Gıda Dergisi*, 1, 1(Ocak).

- Mondal, A., & Datta, A. K. (2008). Bread baking—A review. *Journal of food engineering*, 86(4), 465-474. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.11.014
- Ozdemir, S., Gocmen, D., & Yildirim Kumral, A. (2007). A traditional Turkish fermented cereal food: Tarhana. *Food Reviews International*, 23(2), 107-121. DOI: 10.1080/87559120701224923
- Özbeý, Z., & Köşker, H. (2021). Türk mutfak kültüründe çorba ve coğrafi işaretli çorbalar üzerine bir değerlendirme. *Gastroia: Journal of Gastronomy and Travel Research*, 5(3), 471-489.
- Özkaya, B. (2019). Ekmek. Fermente Gıdalar: Mikrobiyoloji, Teknoloji ve Sağlık, Anlı, E. ve Şanlıbaba, P. (baş ed.), *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, s. 501-540.
- Özkaya, B. (2021). Ekmek Üretim Teknolojisi, (Edit. Prof. Dr. Hamit Köksel)”. *Sidas Medya Ltd. Şti.*, İzmir, 291-314.
- Öztürk, R. İ., & Garipağaoğlu, M. (2018). Tuz tüketimi ve sağlık. *Türkiye Klinikleri Sağlık Bilimleri Dergisi*.
- Sarıtaş, S. (2023). Coğrafi İşaretleri Açısından Balıkesir İli Üzerine Bir Değerlendirme. *Kültür Araştırmaları Dergisi*, 19, 308-325.
- Sokmen, O., Gürçam, Ö. S., DüNDAR, A. N., & Sarıcaoğlu, F. T. (2022). What have been highly pointed in bread and sourdough researches: using bibliometric analysis as a powerful tool. *European Food Science and Engineering*, 3(1), 36-43. DOI: 10.55147/efse.1121959
- Sönmez, H. (2023). *Yerel lezzetlerin destinasyon seçim sürecine etkisi ve gastronomi turizmi açısından incelenmesi: Edremit Körfezi örneği* [Yüksek Lisans Tezi]. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Teyin, G. (2020). Kültürel bir miras; tören keşkeği geleneği. *Gastroia: Journal of Gastronomy and Travel Research*, 4(2), 313-321.
- TGK, (2012). Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği, Resmi Gazete, 04.01.2012/28163, Tebliğ No:2012/2, Ankara.
- TGK, (2013a). Türk Gıda Kodeksi Buğday Unu Tebliği, Resmi Gazete, 02.04.2013/28606, Tebliğ No:2013/19, Ankara.
- TGK, (2013b). Türk Gıda Kodeksi Ekmek ve Ekmek Çeşitleri Tebliği (Tebliğ no: 2012/2)’nde değişiklik yapılmasına Dair tebliğ (Tebliğ no: 2013/10), <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/04/20130402-8.htm> adresinden 31 Mart 2021 tarihinde alınmıştır.

- Wilson, N., Nghiem, N., Eyles, H., Mhurchu, C. N., Shields, E., Cobiac, L. J., Cleghorn, C. L. & Blakely, T. (2015). Modeling health gains and cost savings for ten dietary salt reduction targets. *Nutrition Journal*, 15, 1-10.
- Yıldırım, Ç. & Güzeler, N. (2016). Tarhana Cipsi, *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5, 1-8.
- Yıldız, B. (2020). *Taze Meyvelerden Elde Edilen Ekşi Mayaların Ekmeklerin Kalite Özellikleri Üzerindeki Etkisinin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Yıldız, B., Çakıcı, A., Uslu, D. Y., & Uslu, H. (2021). Ekmek üretiminde ekşi maya üzerine taze meyvelerin kullanımının etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 150-159. DOI:10.28948/ngumuh.756207
- Yiğit, A. H., & Doğan, İ. S. (2010). Ağrı ilindeki ekmek fırınlarının bazı özelliklerinin değerlendirilmesi üzerine bir anket çalışması. *Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences*, 20(2), 75-87.



EFFECT OF HEAT TREATMENT ON WEAR BEHAVIOR OF AISi10Mg ALLOY FABRICATED BY CASTING

DÖKÜM İLE ÜRETİLEN AISi10Mg ALAŞIMININ AŞINMA DAVRANIŞINA
ISIL İŞLEMİN ETKİSİ

Halit ERCAN¹

Kenan CAN²

İbrahim Savaş DALMIŞ³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfdb.1470743>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
idalmis@nku.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
19.04.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
15.10.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
06.11.2024

Abstract

The ease of processing aluminum due to its mechanical and chemical properties, along with various manufacturing methods, has increased its usage in the industry. This study involves tests conducted on the samples produced from EN AC-43000 (AISi10Mg) aluminum casting material, which finds applications in machine manufacturing. The tests aimed to determine the mass loss and friction coefficients of the test specimens. Wear experiments were carried out according to ASTM G99 using a specialized test machine. The abrasive disc used in the wear machine has a surface hardness of 62 HRC and a surface roughness value (Ra) of 1,6 µm, and it is made of 1,2379-X155CrVMo12-1 cold work tool steel. Adhesive wear tests were conducted on the test specimens under loads of 14,7, 24,5, and 34,3 N. When the mass losses of the samples were examined, the wear rate decreased as the aging temperature increased up to 200 °C. On the other hand, it was observed that the wear rate increased at 220 °C, unlike aging at lower temperatures.

Keywords: Aging temperature, wear, adhesive wear, friction coefficient.

Öz

Alüminyumun mekanik ve kimyasal özelliklerinin yanı sıra farklı imalat yöntemleri ile işlenebilirliğinin kolaylığı endüstride kullanımını arttırmıştır. Çalışmada makine imalatında da kullanım alanı bulan EN AC-43000 (AISi10Mg) alüminyum döküm malzemeden üretilen numuneler ile yapılan testler ile test numunelerinin kütle kaybı ve sürtünme katsayıları saptanmıştır. Araştırmada aşınma deneyleri; ASTM G99'a göre imal edilmiş özel bir test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma makinesinde kullanılan aşındırıcı disk 62 HRC yüzey sertliği ve 1,6 µm yüzey pürüzlülük değerine (Ra) sahip; 1,2379-X155CrVMo12-1 soğuk iş takımı çeliğinden üretilmiştir. Çalışmada kullanılan test numunelerinin 14,7; 24,5 ve 34,3 N yük altında adhezif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kütle kayıplarını incelendiğinde, yaşlandırma sıcaklığı 200 °C'ye çıktıkça aşınma oranının azaldığı görüldü. Öte yandan, daha düşük sıcaklıklardaki yaşlandırmanın aksine, 220 C'de aşınma oranının arttığı gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Yaşlandırma sıcaklığı, aşınma, adhezif aşınma, sürtünme katsayısı.

* Bu yayının Halit ERCAN isimli öğrencinin Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. halittecann@gmail.com. Orcid.org/0009-0007-5454-2664.

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. kcan@nku.edu.tr. Orcid.org/0000-0003-1770-1180.

³ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tekirdağ, Türkiye. idalmis@nku.edu.tr. Orcid.org/0000-0002-4401-9155.

1. INTRODUCTION

The prevalent use of aluminum alloys in the industry is primarily due to their high specific strength, commendable corrosion resistance, and excellent thermal and electrical conductivity (Zang et al., 2023; Yan et al., 2020, Maji et al., 2020). Among aluminum alloys, Al-Si casting alloys, such as AlSi10Mg, play a crucial role in automotive and aerospace applications, particularly in components like combustion engines, clutches, pistons, pulleys, rockers, pivots, and liners (Gabor et al., 2022; Liu et al., 2021; Gite et al., 2023; Shakil et al., 2021; Shankar & Elango, 2017; Prasat et al., 2011; Dwivedi, 2006). Addition of silicon is known to enhance wear resistance in Al-Si alloys (Dwivedi, 2006; Kan et al., 2021).

Researchers have extensively investigated the mechanical and tribological behavior of Al-Si alloys. For instance, Prasat et al. (2011) studied the dry sliding wear and friction coefficient of AlSi10Mg-Fly ash-graphite hybrid composites, finding that sliding distance was the predominant factor influencing wear and friction coefficient. Senthilkumar et al. (2015) explored the dry sliding wear and friction behavior of AlSi10Mg alloy reinforced with rice husk ash, observing that the wear rate and friction coefficient were mainly influenced by the ratio of reinforcing particles, followed by applied load and sliding speed. Jiang et al. (2024) examined the effects of Mg-Gd master alloy addition on the microstructure and mechanical properties of Al-10Si aluminum alloy. As a result of the studies, they concluded that the addition of these alloys caused changes in the microstructure of the Al-10Si aluminum alloy and caused a significant increase in its mechanical properties. Kan et al. (2021) conducted a comprehensive investigation into the tribological properties of AlSi10Mg alloy fabricated by laser powder bed fusion. They subjected the alloy to dry sliding wear tests against both a bearing stainless steel and silicon carbide. The results indicated that the T6 heat treatment, either had no statistically significant effect or, in certain cases, adversely influenced the alloy's performance. Nirish and Rajendra (2022) investigated the wear and friction behavior of AlSi10Mg alloy produced through selective laser melting (SLM). They compared it to a conventionally cast Al6061 alloy. The researchers used a pin-on-disc machine to test the wear of the materials under different conditions. The findings unequivocally demonstrated that the SLM-AlSi10Mg alloy exhibited superior wear resistance and overall mechanical properties in comparison to as-cast Al6061. Gong et al. (2023), investigated the wear resistance of two aluminum alloys, Al-12Si and Al-2.5Fe, fabricated using laser powder bed fusion (LPBF). Their findings demonstrated that alloys produced via LPBF can exhibit exceptional wear resistance. They attributed this to the increased hardness resulting from the rapid cooling rate in the LPBF process, as well as the significant dispersion of fine secondary phases.

AlSi10Mg alloy, belonging to the hypoeutectic aluminum alloys group, typically contains 10 wt% Si and less than 0,45 wt% Mg (Gite et al., 2022; de Moura et al., 2022). This alloy is notable for not requiring preheating before and after casting (Senthilkumar et al., 2015). In this study, different aging temperatures and durations were applied to AlSi10Mg alloy after solution heat treatment at 540°C for 2 h and subsequent quenching. The precipitation hardening process yielded a coefficient of friction and adhesive wear values, determined by a test device conforming to ASTM G99.

2. MATERIAL AND METHOD

The material employed in the experimental studies is the AlSi10Mg casting alloy. The density of the test material is 2,66 g/cm³. Test specimens prepared with dimensions of Ø10x20 mm were used in the experiment. The mass of the specimens was weighed before and after sliding wear by weighing machine with an accuracy of 0,0001 g after cleaning with alcohol.

All samples were solution heat treated at 540°C for 2 h and then quenched in water at room temperature. Then, artificial aging processes were carried out at temperatures of 160°C, 180°C, 200°C and 220°C (Table 1 and Figure 1). Girelli et al. (2018) applied precipitation hardening heat treatment to AlSi10Mg aluminum alloy in their study. In the experiments, the samples were solution heat treated at 480°C, 510°C and 540°C, and were artificially aged at 160°C for 4 h.

Table 1. Age Hardening Treatments

| Specimen | Temperature (°C) (Tx) | Time (h) |
|----------|-----------------------|----------|
| 1 | 160 | 4 |
| 2 | 180 | 4 |
| 3 | 200 | 4 |
| 4 | 220 | 4 |

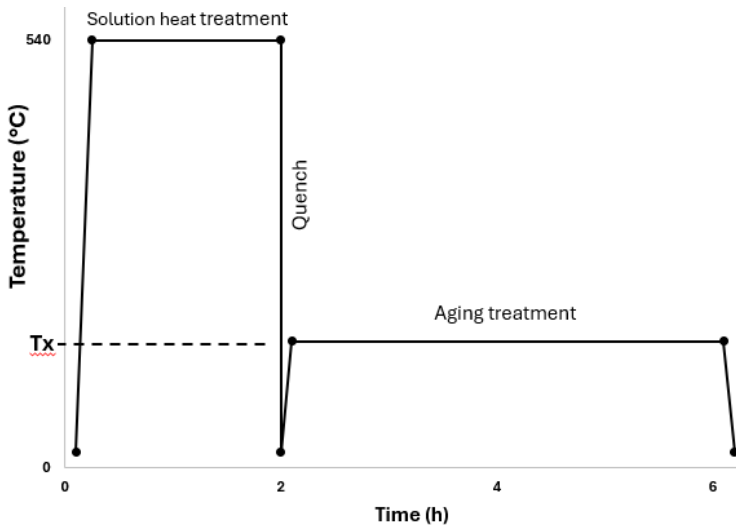


Figure 1. Diagrams Showing the Three Steps of Precipitation Hardening Applied to the 6 Test Specimens

A test machine designed and manufactured according to ASTM G-99 was used to evaluate the dry sliding wear and friction response of the specimen (Figure 2). Ø100x20 mm disc made of 1.2379-X155CrVMo12-1 cold work tool steel having a surface

hardness of 62 HRC and a surface roughness of $1,6 \mu\text{m}$ was used during the dry sliding wear test.

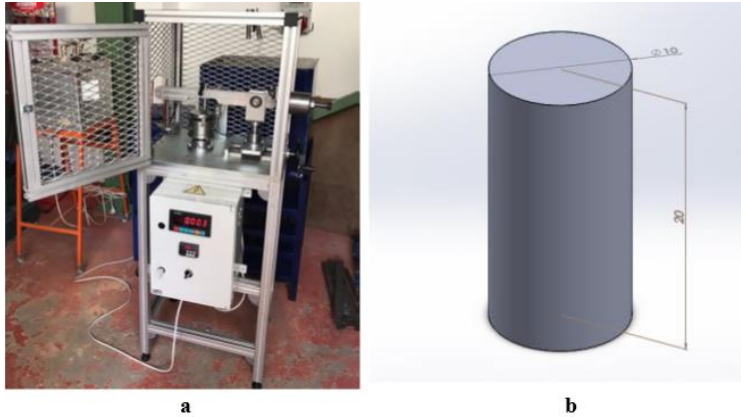


Figure 2. a) Adhesive Wear Testing Machine, b) Test Specimen Dimensions

Wear and friction characteristics of samples were evaluated at 1000 m sliding distances, 0,1 m/s sliding velocities, and 14,7 N, 24,5 N, and 34,3 N applied loads respectively. The tangential frictional force was obtained using the pin-on-disc machine during the sliding wear test. The coefficient of friction was calculated with the formula in Equation (1).

$$F_S = F_N \cdot \mu \quad (1)$$

where F_S is the tangential frictional force, F_N is the normal force and μ is the coefficient of friction. The most used measurement method for calculating wear is the weight difference method. The Equations (2) and (3) used in the weight difference method are presented below (Soydaş, 2006).

$$Wa = \frac{\Delta G}{d \cdot M \cdot S} \text{ (mm}^3/\text{N} \cdot \text{m)} \quad (2)$$

where Wa ($\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) is the wear rate, ΔG (mg), is the mass loss, M is the load (N), S is the wear distance (m), and d is the density (gr/cm^3).

Wear resistance (W_r) is defined as the inverse of the wear rate and is shown in Equation (3).

$$W_r = \frac{1}{W_a} \text{ (N} \cdot \text{m}/\text{mm}^3) \quad (3)$$

The wear surfaces of the samples were examined with an Optika B-500 MET optical microscope. To determine the hardness of samples, a microhardness test was performed with an HV hardness scale under 100 g loads by a Microbul 1000-DN test device. Microhardness measurements were carried out by taking the average of a total of 5 measurement values taken from each sample. (Can et al., 2022)

3. RESULT AND DISCUSSION

Mass losses of the specimens and microhardness values are given in Table 2. Figure 3 also shows the mass losses of specimens depending on the applied loads. Averages of the F values and coefficient of friction (CoF) are given in Table 3.

Table 2. Age Hardening Treatments

| Specimen | Applied Load (N) | | | Total mass loss (mg) | Hardness |
|----------|------------------|----------------|----------------|----------------------|-------------------|
| | 14,7 N | 24,5 N | 34,3 N | | HV _{0,1} |
| | Mass loss (mg) | Mass loss (mg) | Mass loss (mg) | | |
| 1 | 5,3 | 7,8 | 10,2 | 23,3 | 79,3 |
| 2 | 5,4 | 7,6 | 10 | 23 | 85,16 |
| 3 | 4,6 | 7,2 | 9,8 | 21,6 | 133,14 |
| 4 | 6,3 | 8,5 | 11 | 25,8 | 68,8 |

It has been determined that the coefficient of friction “ μ ” values obtained as a result of the wear tests for each sample with different weights have approximately the same values even if the weight increases. The highest coefficient of friction value is seen in the 4th sample with an average value of 0,883, and the lowest coefficient of friction value is seen in the 3rd specimen with an average of 0,785 (Figure 4).

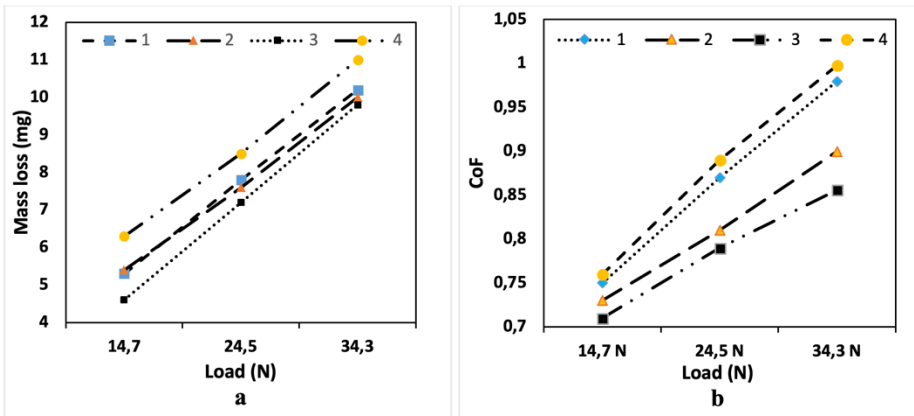


Figure 3. Variation in (a) Mass Loss of Specimens and (b) Average Friction Coefficient of Specimens Under Different Loads

Table 3. Values of Average F and Coefficient of Friction (COF)

| Specimen | Applied Load (N) | | | | | | Average CoF |
|----------|------------------|------|-----------------|------|-----------------|-------|-------------|
| | 14,7 N | | 24,5 N | | 34,3 N | | |
| | F _{Av} | CoF | F _{Av} | CoF | F _{Av} | CoF | |
| 1 | 11,03 | 0,75 | 21,32 | 0,87 | 33,61 | 0,98 | 0,867 |
| 2 | 10,73 | 0,73 | 19,85 | 0,81 | 30,87 | 0,9 | 0,813 |
| 3 | 10,44 | 0,71 | 19,36 | 0,79 | 29,36 | 0,856 | 0,785 |
| 4 | 11,17 | 0,76 | 21,81 | 0,89 | 34,23 | 0,998 | 0,883 |

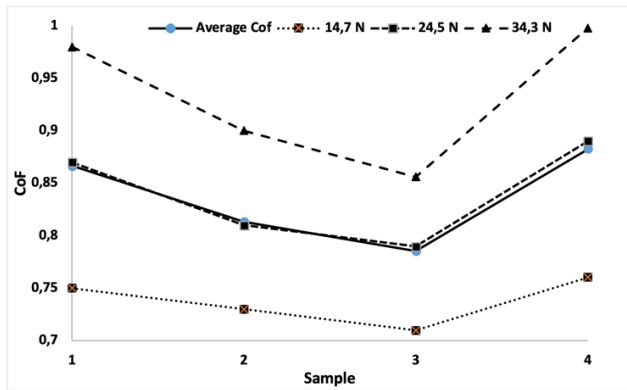


Figure 4. Average CoF Values of All Specimens

When Figure 5 is examined, mass losses depending on the hardness of the samples can be seen. The graph shows us the relationship between hardness and wear, and as hardness increases, wear decreases accordingly. Beder et al. (2023) also stated that hardness affects wear.

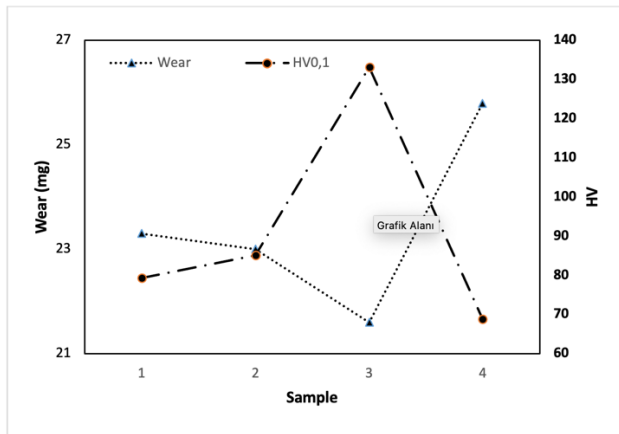


Figure 5. Total Mass Loss Versus Hardness of Samples

Average wear rates and average wear resistances of the samples are presented in Table 4 and Table 5. Figure 6 and Figure 7 obtained from these tables show us the relationship between the CoFs and wear rates of the samples and the relationship between hardness and wear resistance, respectively.

Table 4. Values of Average Wear Rate

| Specimen | Applied Load (N) | | | Average wear rate (mm ³ /N.m) x10 ⁻⁴ |
|----------|---|---|---|---|
| | 14,7 N | 24,5 N | 34,3 N | |
| | Wear rate (mm ³ /N.m) x10 ⁻⁴ | Wear rate (mm ³ /N.m) x10 ⁻⁴ | Wear rate (mm ³ /N.m) x10 ⁻⁴ | |
| 1 | 1,36 | 1,20 | 1,09 | 1,21 |
| 2 | 1,38 | 1,17 | 1,06 | 1,20 |
| 3 | 1,18 | 1,10 | 1,04 | 1,11 |
| 4 | 1,61 | 1,30 | 1,17 | 1,36 |

Table 5. Values of Average Wear Resistance

| Specimen | Applied Load (N) | | | Average wear resistance (mm ³ /N.m) ⁻¹ x10 ⁴ |
|----------|--|--|--|--|
| | 14,7 N | 24,5 N | 34,3 N | |
| | Wear resistance (mm ³ /N.m) ⁻¹ x10 ⁴ | Wear resistance (mm ³ /N.m) ⁻¹ x10 ⁴ | Wear resistance (mm ³ /N.m) ⁻¹ x10 ⁴ | |
| 1 | 0,74 | 0,84 | 0,92 | 0,83 |
| 2 | 0,72 | 0,86 | 0,94 | 0,84 |
| 3 | 0,85 | 0,91 | 0,96 | 0,90 |
| 4 | 0,62 | 0,77 | 0,85 | 0,75 |

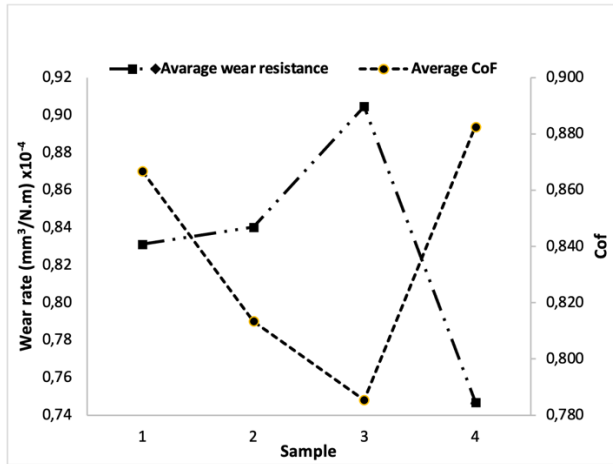


Figure 6. The Wear Rate and Average Friction Coefficient at the Samples

A comparison of the average steady-state coefficient of friction (CoF) values for the samples is shown in Fig. 6. The CoF values for all samples ranged between 0,80 and 0,89, with minimal variation, except for a slightly higher value observed for sample S4. These CoF values are consistent with the range typically seen in aluminum alloys under dry sliding conditions, which generally spans from 0,4 to 0,9, depending on the specific test conditions and alloy used (Straffelini, 2015). Therefore, it can be concluded that the heat treatment conditions and the resulting differences in microstructure and hardness for the AlSi10Mg alloy (as seen in Fig. 6) do not significantly impact the CoF, as noted in previous studies (Straffelini, 2015; Ren et al., 2023).

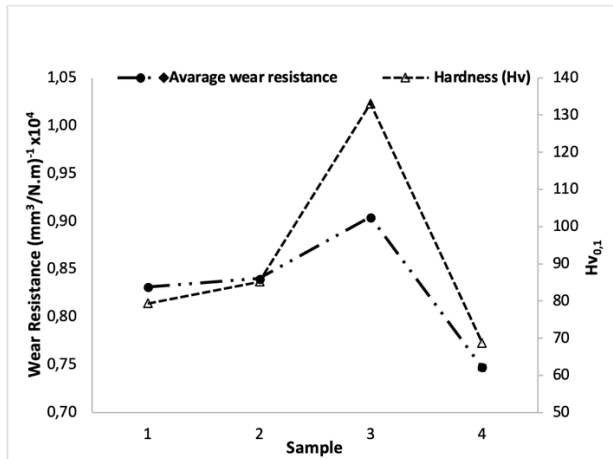


Figure 7. The Average Wear Resistance and Hardness of the Samples

After conducting the wear tests, the worn surfaces of the samples were observed using an optical microscope. It was identified that there are variations in elevation between the dark and bright areas, attributed to adhesive fractures. Furthermore, the lines

observed in the sliding direction within the bright areas were identified as abrasive wear lines, formed by the adhesive wear debris that accumulated on the surface of the abrasive disc.

Numerous studies on wear mechanisms validate the link between adhesive and abrasive wear, as well as the subsequent formation of wear lines during sliding. Adhesive wear typically begins when surfaces come into contact, leading to material transfer. Over time, this transferred material becomes embedded between the surfaces, contributing to the formation of abrasive wear patterns, often observed as grooves or lines parallel to the sliding direction (Chawla & Chawla, 2013). The presence of wear debris on the abrasive surface further intensifies the wear process, resulting in visible scratches, especially in the bright areas, where the material becomes more polished due to prolonged friction (Straffelini, 2015).

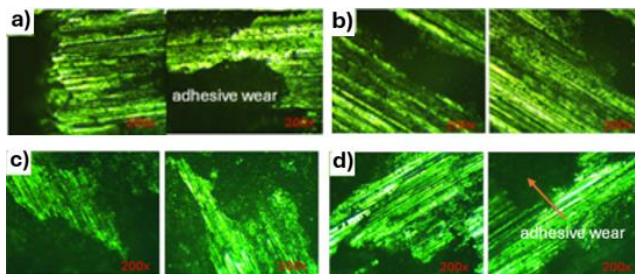


Figure 8. Wear Surface of Specimens, a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 (200x Magnification)

The differences in CoF trends in Fig. 6 can be explained by the stability of the transfer layers formed at the contact interface during wear tests. The second hard phase, composed of Si particles, plays a significant role in this. These particles can cause localized fracture phenomena, thereby disrupting the formation of a protective transfer layer on the worn surface. This is evident in Fig. 8(a–d), where thick transfer layers formed on the counter material surfaces due to severe adhesive wear of the AISi10Mg disk (Fig. 9(e–d)). The presence and stability of these layers correlate with wear depth (WD).

From the observations, the average WD values suggest that WD is lower for sample S3 compared to S1, and in general, WD increases as hardness decreases (as shown in Fig. 7). This trend is linked to the microstructural differences in the alloy, particularly the distribution of silica grains and the α phase, which are crucial for determining mechanical properties.

Moreover, aging heat treatments induce the nucleation of θ particles within the α grains, contributing to the alloy's mechanical behavior. Although these θ particles are too small to detect optically, their influence can be indirectly observed via hardness tests. The microstructural images in Fig. 9 also show that the silica grains are partially reduced after aging, further influencing mechanical performance (Beder et al., 2023).

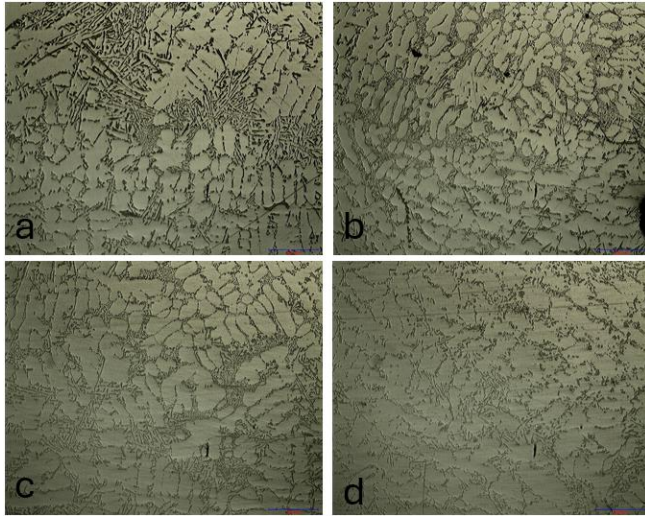


Figure 9. Light Microscopy (LM) Image of the Microstructure of Hypoeutectic AlSi10Mg Alloy
a) S1, b) S2, c) S3, d) S4 (mass loss are $3 < 2 < 1 < 4$, respectively) (X250)

The decline in mechanical properties of aluminum alloys when aging temperatures exceed 200°C is primarily attributed to overaging. During this process, the microstructure of the alloy coarsens, weakening the strengthening effect achieved through the precipitation of fine particles. Up to 200°C , precipitates like the β'' phase in Al-Mg-Si alloys form and are finely dispersed, which impedes dislocation motion, thereby strengthening the material via precipitation hardening (Ren et al., 2023; Chang et al., 2024).

However, when the aging temperature surpasses 200°C , these precipitates begin to grow and coarsen. The larger precipitates are less effective at blocking dislocations, resulting in decreased mechanical strength and hardness. At 220°C and higher, this coarsening becomes more pronounced, making the alloy softer and more susceptible to wear (Chang et al., 2024). Additionally, higher temperatures can lead to the formation of secondary or unstable phases, which further degrade the alloy's resistance to mechanical stress.

In samples aged at higher temperatures, such as S4, the dissolved silicon (as seen in Fig. 9) increases, indicating a need to examine the long-term stability of mechanical properties in as-built structures. Up to 200°C , precipitates survive and grow, filling the cell centers and contributing to higher hardness values through both precipitation hardening and Hall-Petch strengthening mechanisms, as observed in Fig. 6. The presence of Mg_2Si particles also contributes to this enhanced hardness, although the influence of dislocations becomes limited at higher temperatures (Ren et al., 2023).

4. CONCLUSION

In the study, the effects of different aging temperatures applied to test samples produced from EN AC-43000 (AlSi10Mg) aluminum casting material were examined. It was observed that although sample number 1 suffered more mass loss than sample number 2 at 24,5 and 34,3 N loads, it showed a lower mass loss than sample number 2 under 14,7 N load, unlike the other loads. It is thought that the reason for this is that the wear mechanism changes from adhesive wear to abrasive wear. When Figure 3b is examined, under 14,7 N load, the CoF graph of sample 1 tends to decrease, while the CoF graph of sample 2 tends to increase, and this strengthens our opinion that the wear mechanism has changed. Considering the result of the wear values obtained from the samples, the mass loss of sample 4 is higher than the other samples. It has been observed that as a result of adhesive wear, the fragments pulled off from the samples adhered to the abrasive disc surface, resulting in abrasive wear and serious scratches. Considering the total mass losses, the samples with the least mass loss are 3<2<1<4, respectively. In the tests performed, the CoF value was low in samples 2 and 3. The wear to which these samples are exposed is considered to be mostly abrasive wear. It was seen that the CoF value was high in numbers 1 and 4, and when the microstructures were examined, it was concluded that the wear type here was adhesive wear. Finally, when the mass losses of the samples were examined, it can be said that the increase in aging temperature increased the wear resistance but after 220 °C depending on the hardness loss wear resistance decreased.

Authorship Contributions

The authors confirm that they equally contributed to this paper.

Acknowledgment

The test rig manufacturing processes used in the study were supported by Dogan Mekatronik.

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

- Beder, M., Akçay, S. B., Varol, T., & Çuvalcı, H. (2024). The Effect of Heat Treatment on the Mechanical Properties and Oxidation Resistance of AlSi10Mg Alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-12.
- Can, K., Dalmış, F., & Dalmış, İ. (2022). Design and Implementation of PLC Based Special Purpose Machine for Surface Coating. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33), 338-343.

- Chang, Z., Liu, L., Sui, Z., Yan, X., Li, Y., Zhang, Y., ... & Yang, M. (2024). Effect of Aging Temperature on Pitting Corrosion of AA6063 Aluminum Alloy. *Metals and Materials International*, 30(6), 1556-1570.
- Chawla, N., Chawla, K.K. (2013). *Wear and Corrosion. In: Metal Matrix Composites*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9548-2_10
- de Moura, D. A., de Gouveia, G. L., Gomes, L. F., & Spinelli, J. E. (2022). Understanding the effect of Ni content on microstructures and tensile properties of AlSi10Mg alloy samples under a variety of solidification rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 924, 166496.
- Dwivedi, D. K. (2006). Wear behaviour of cast hypereutectic aluminium silicon alloys. *Materials & design*, 27(7), 610-616.
- Gabor, R., Prymus, T., Cvrček, L., Nehasil, V., Hlinka, J., Buřil, M., ... & Seidlerová, J. (2022). Final surface modification for better wear resistance of ceramic coating on cast AlSi10Mg alloy. *Ceramics International*, 48(24), 37433-37447.
- Gite, R. E., & Wakchaure, V. D. (2023). A review on process parameters, microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy. *Materials Today: Proceedings*, 72, 966-986.
- Gong, S., Takata, N., Kobashi, M., & Shin, S. E. (2023). Wear properties of aluminum alloys fabricated by laser powder bed fusion. *Tribology International*, 187, 108769.
- Jiang, B., Jiang, B., Yang, W., Wang, Y., Xu, H., Hu, M., & Guo, Y. (2024). Efficient modification eutectic Si of Al-10Si alloy with Mg-Gd master alloy addition. *Materials Letters*, 136071.
- Kan, W. H., Huang, S., Man, Z., Yang, L., Huang, A., Chang, L., ... & Proust, G. (2021). Effect of T6 treatment on additively-manufactured AlSi10Mg sliding against ceramic and steel. *Wear*, 482, 203961.
- Liu, C., Wang, Q., Cao, X., Cha, L., Ye, R., & Ramachandran, C. S. (2021). Significance of plasma electrolytic oxidation treatment on corrosion and sliding wear performances of selective laser melted AlSi10Mg alloy. *Materials Characterization*, 181, 111479.
- Maji, P., Ghosh, S. K., Nath, R. K., & Karmakar, R. (2020). Microstructural, mechanical and wear characteristics of aluminum matrix composites fabricated by friction stir processing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 1-24.

- Nirish, M., & Rajendra, R. (2022). Optimization Process Parameter on Wear Characterization of Al6061 and AlSi10Mg Alloy Manufactured by Selective Laser Melting. *International Journal of 3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(1), 1-10.
- Prasat, V., Subramanian, R., Radhika, N., & Anandavel, B. (2011). Dry sliding wear and friction studies on AlSi 10 Mg-fly ash-graphite hybrid metal matrix composites using Taguchi method. *Tribology- Materials, Surfaces & Interfaces*, 5(2), 72-81.
- Ren, J., Hong, Z., Zhou, Q., Xu, X., & Yin, S. (2023). Effect of Aging Treatment Temperature on Microstructure and Properties of Al-Si-Mg Cast Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-9.
- Senthilkumar, M., Saravanan, S. D., & Shankar, S. (2015). Dry sliding wear and friction behavior of aluminum-rice husk ash composite using Taguchi's technique. *Journal of composite materials*, 49(18), 2241-2250.
- Shakil, S. I., Hadadzadeh, A., Pirgazi, H., Mohammadi, M., & Haghshenas, M. (2021). Indentation-derived creep response of cast and laser powder bed fused AlSi10Mg alloy: Air temperature. *Micron*, 150, 103145.
- Shankar, S., & Elango, S. (2017). Dry sliding wear behavior of palmyra shell ash-reinforced aluminum matrix (AlSi10Mg) composites. *Tribology Transactions*, 60(3), 469-478.
- Soydaş, S. (2006). *Üniversal aşınma test cihazı tasarımı ve imalatı* [Master's thesis]. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Straffelini, G. (2015). *Wear Mechanisms. In: Friction and Wear*. Springer Tracts in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05894-8_4
- Wahlström, J., Lyu, Y., Matjeka, V., & Söderberg, A. (2017). A pin-on-disc tribometer study of disc brake contact pairs with respect to wear and airborne particle emissions. *Wear*, 384, 124-130.
- Yan, Q., Song, B., & Shi, Y. (2020). Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting. *Journal of Materials Science & Technology*, 41, 199-208.
- Zhang, P., Liu, J., Gao, Y., Liu, Z., & Mai, Q. (2023). Effect of heat treatment process on the micro machinability of 7075 aluminum alloy. *Vacuum*, 207, 111574.



MECHANICAL PROPERTIES OF CLAY/LLDPE AND ORGANOCLAY/LLDPE NANOCOMPOSITES

KİL/LLDPE VE ORGANİK KİL/LLDPE NANOKOMPOZİTELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Ebru GÜNİSTER¹

Edgar Alejandro Ayala IRACHETA²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1580794>

Corresponding Author
(Sorumlu Yazar)
ebru.gunister@istun.edu.tr

Received
(Geliş Tarihi)
08.11.2024

Revised
(Revizyon Tarihi)
25.12.2024

Accepted
(Kabul Tarihi)
25.12.2024

Abstract

Linear low-density polyethylene (LLDPE) is widely used in many areas in daily life because it is both light and flexible. In this study, clay/LLDPE and organoclay/LLDPE nanocomposites were obtained by melt intercalation method, incorporating small amounts (1- 5 wt.%) of nanosized clay and organoclay modified with a positively charged salt to enhance the mechanical properties of the polymer. Characterization and mechanical tests showed that the mechanical strength of the composites increased with additive content, though some flexibility was partially lost. FTIR and XRD analyses confirmed that clay and organoclay interacted with polymer chains and dispersed homogeneously. ANOVA results demonstrated that both filler type and concentration significantly influence the mechanical properties, with organophilic organoclay showing superior interaction to the LLDPE matrix compared to hydrophilic clay. Specifically, the addition of 5 wt.% organoclay resulted in increases of 56,67%, 58,73%, and 39,53% in elastic modulus, yield strength, and tensile strength, respectively. Additionally, the observed 5% rise in melting temperature suggests potential for expanding the application range of these nanocomposites to areas requiring thermal stability.

Keywords: Clay, LLDPE, mechanical properties, nanocomposite, organoclay.

Öz

Lineer düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE), hem hafif hem de esnek olması nedeniyle günlük yaşamda birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, polimerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla pozitif yüklü tuz ile modifiye edilmiş organokil ve nano boyutlu kilin düşük miktarlarının (ağ. %1-5) kullanıldığı eriyik interkalasyon yöntemi ile kil/LLDPE ve organokil/LLDPE nanokompozitleri elde edilmiştir. Karakterizasyon ve mekanik testler, katkı miktarının artışıyla kompozitlerin mekanik dayanımının arttığını ancak esnekliklerinin kısmen azaldığını göstermiştir. FTIR ve XRD analizleri, kil ve organokilin polimer zincirleriyle etkileşime girerek homojen bir şekilde dağıldığını doğrulamıştır. ANOVA sonuçları, dolgu tipi ve konsantrasyonunun mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve organofilik organokilin, hidrofilik kile kıyasla LLDPE matrisi ile daha üstün bir etkileşime gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle, %5 ağırlık oranında organokil ilavesi ile elastik modülde %56,67, akma dayanımında %58,73 ve çekme dayanımında %39,53 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca, erime sıcaklığındaki %5'lik artış, bu nanokompozitlerin sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılık gerektiren uygulama alanlarında kullanım potansiyelini artırabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kil, LLDPE, Mekanik özellikler, Nanokompozit, Organokil.

¹Istanbul Health and Technology University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Mechanical Engineering, İstanbul, Türkiye.

ebru.gunister@istun.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-7797-604X.

²Accenture, Quality Engineering, Architecture Manager, Monterrey, Nuevo León, Mexico.
edgar.ayala.iracheta@gmail.com, Orcid.org/0009-0004-6409-2933.

1. INTRODUCTION

Polyethylene (PE), a widely used petroleum-based polymer as a under the group of polyolefins, encompasses various types with distinct chemical structures, depending on production conditions like pressure and temperature. These types are categorized by density and branching characteristics and labelled such as high density polyethylene (HDPE), low density polyethylene (LDPE), ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE), and cross-linked polyethylene (PEX). Among these, linear low density polyethylene (LLDPE) is defined by its unique structure: it consists of a linear carbon backbone with short, evenly spaced alkyl branches, which disrupt crystalline formation (Peacock, 2000). As a result, LLDPE exhibits enhanced stiffness and strength than LDPE, and better ductility than HDPE while maintaining a density range of 0,915–0,940 g/cm³.

Structurally, LLDPE combines the flexibility of LDPE with the strength of HDPE, leading to superior chemical and mechanical resilience. These qualities make it ideal for applications in flexible plastic sheeting, packaging, and transportation. Therefore, LLDPE is widely used in various industries for products such as packaging films, agricultural mulch, lay-flat pipes, water tubing, and low-temperature food containers, making it one of the most produced common plastics worldwide due to its flexibility, strength, and durability. Enhancing LLDPE's properties can expand its usage, achieved by incorporating fillers or active functional particles to tailor characteristics as needed.

Research on improving LLDPE's application potential has surged since the 1980s, especially as nanoparticles became popular additives in the 1990s (LeBaron et al., 1999). Recent studies underscore LLDPE's role in agriculture, where its use as a mulching film enhances soil protection, water retention, and weed control, while also extending durability under weathering (Liu et al., 2002; Mansoor et al., 2021; Wadgaonkar & Mehta, 2019). To enhance LLDPE economically, various additives—such as clay (As'Habi, 2013; Durmus et al., 2007; Mir et al., 2017; Mousavi et al., 2016; Sabetzadeh et al., 2016; Said et al., 2020; Stoeffler et al., 2011), silica (Kontou & Niaounakis, 2006), carbon (Liu et al., 2002), carbon nanotubes (Mezghani et al., 2011), and graphene oxide (Li et al., 2019)—have been explored for their effects on LLDPE's gas barrier, thermal stability, UV resistance, and fatigue properties. Hotta and Paul (2004) demonstrated that organoclays, within a 0,8–6,9 wt.% range, improve the mechanical performance of LLDPE.

In this study, the montmorillonite clay from Turkiye was used to investigate the effect of nanofiller on the mechanical properties of LLDPE. Given its hydrophilic nature, the clay was converted to an organoclay via interaction with a cationic surfactant (Gunister et al., 2004) to enhance compatibility with the LLDPE matrix. Besides mechanical improvements, this study also targets enhanced thermal stability. While prior studies incorporated up to 10 wt.% of nanosized clay, this research aims to achieve comparable or superior mechanical performance at lower concentrations.

2. NANOCOMPOSITES PREPARATION AND TESTING

2.1. Materials

The clay sample was sourced from the bentonite deposits in Edirne-Lalapasa, Turkiye. Analysis identified the dominant clay mineral as 98 wt.% montmorillonite, with minor components of 0,5–1 wt.% illite, 1–2 wt.% calcite, 0–1 wt.% feldspar, and 0–0,2 wt.% quartz. The chemical composition, determined using atomic absorption spectroscopy (Perkin Elmer 3030) except for silica (measured gravimetrically), was as follows: 56,77% SiO₂, 19,27% Al₂O₃, 3,50% CaO, 4,54% Na₂O, 4,48% MgO, 2,33% Fe₂O₃, 0,41% K₂O and 0,22% TiO₂. The clay particles consist of two tetrahedral silica sheets sandwiching a central octahedral alumina sheet, with exchangeable Ca²⁺ cations between the layers. To modify the clay's surface properties, Na⁺ activated clay was treated with the cationic surfactant hexadecyltrimethylammonium bromide (HDTABr, C₁₉H₄₂NBr, molecular weight 364,46 gr/mol, supplied by Merck) following the procedure outline by Canbaz & Gungor (2009). This treatment expanded the clay layers by exchanging Na⁺ ions with HDTABr, converting the clay from hydrophilic to organophilic; the resulting product is termed organoclay.

The LLDPE was supplied by Borouge (Abu Dhabi, UAE) with its density 0,931 g/cm³. The melt flow index measured per ASTM D 1238-10 procedure A at 190°C with a 2,16 kg load was 0,2 g/10 min.

2.2. LLDPE Nanocomposites Preparation

The samples were prepared by melt intercalation method, adding 30 mg, 90 mg, and 150 mg of clay (Clay) per 3 g of LLDPE in mini-compounding machine to achieve 1 wt.%, 3 wt.%, and 5 wt.% Clay/LLDPE nanocomposites. The extrusion parameters were optimized based on the pretesting results of pure LLDPE samples with the LLDPE pellets melted and mixed in a Haake Minilab Rheomex CTW S mini-compounder at temperatures 180-200 °C, rotation speed of 50-100 rpm and mixing times of 5 – 10 minutes. The same procedure was followed using organoclay (OClay) to produce 1 wt.%, 3 wt.% and 5 wt.% OClay/LLDPE nanocomposites.

2.3. Methods for Characterization and Testing of Nanoparticles, LLDPE and LLDPE Nanocomposites

The expansion of clay layers in the presence of LLDPE was analyzed using X-ray diffraction (XRD). PANalytical's X'Pert PRO Materials Research Diffractometer with copper X-ray source was used to determine the expansion of clay layers caused by cationic salt and LLDPE chains. Shifts of the characteristic peaks of LLDPE, Clay and OClay were identified using Bragg's Law from the intensity vs. diffraction angle (2θ) plot. This peak shift provided evidence of expanded interlayer spacing, indicating the interaction between LLDPE and the nanoparticles covering its surface. Moreover, the intensity drop of the peaks also implies the disturbing of crystalline structures.

The bonding interactions between additives (Clay and OClay) and LLDPE were examined by using Thermo Scientific Nicolet iS10 FT-IR spectrometer. The samples for FTIR analysis were prepared as pallets with KBr. The transition temperatures of

LLDPE and its composites were determined using differential scanning calorimetry (DSC) performed on a DSC 204 F1 Netzsch at a heating rate of 10 °C /min.

The dumbbell shape specimens for the mechanical testing were prepared according to ISO527 standard using a Haake Minijet II Thermo Scientific mini-molding machine at 600 bar and 50 °C. Prior to testing, the uniform distribution of the clay particles in the LLDPE matrix, as well as agglomerations and air bubbles was examined under an optical microscope. The tensile properties of LLDPE and its nanocomposites were determined by using the Testometric M350-10CT tensile tester at a strain rate of 5 mm/min, following ISO527. Additionally, the hardness tests were conducted on 2 mm thick specimens of LLDPE and its nanocomposites using a Shore Durometer Model 902-51 Operating Stand, following ASTM D2240. Each test was repeated at least 10 different points across the sample surface to ensure consistent measurements.

The two-way analysis of variance (ANOVA) was applied to evaluate the effect of filler (Clay and OClay) presence and filler material content on the mechanical properties of LLDPE. The two factors are: filler type (Clay and OClay), and amount of filler (1, 3, 5 wt.%).

The mechanical properties assessed included elastic modulus, yield strength, and tensile strength. The ANOVA analysis was based on repeated measurements obtained for each filler concentration. A 95% confidence level was used in all analyses, and factors were considered statistically significant when the p-value was less than 0,05 (Yassin & Gunister, 2023).

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. The Structural and Thermal Characterization

The d-spacing for each scattering angle in all the samples was calculated using Bragg's equation, following the same steps given in the previous work (Li at al. 2019). XRD patterns of clay, organoclay, polymer and polymer nanocomposites are given in Figure 1 a, b and c respectively.

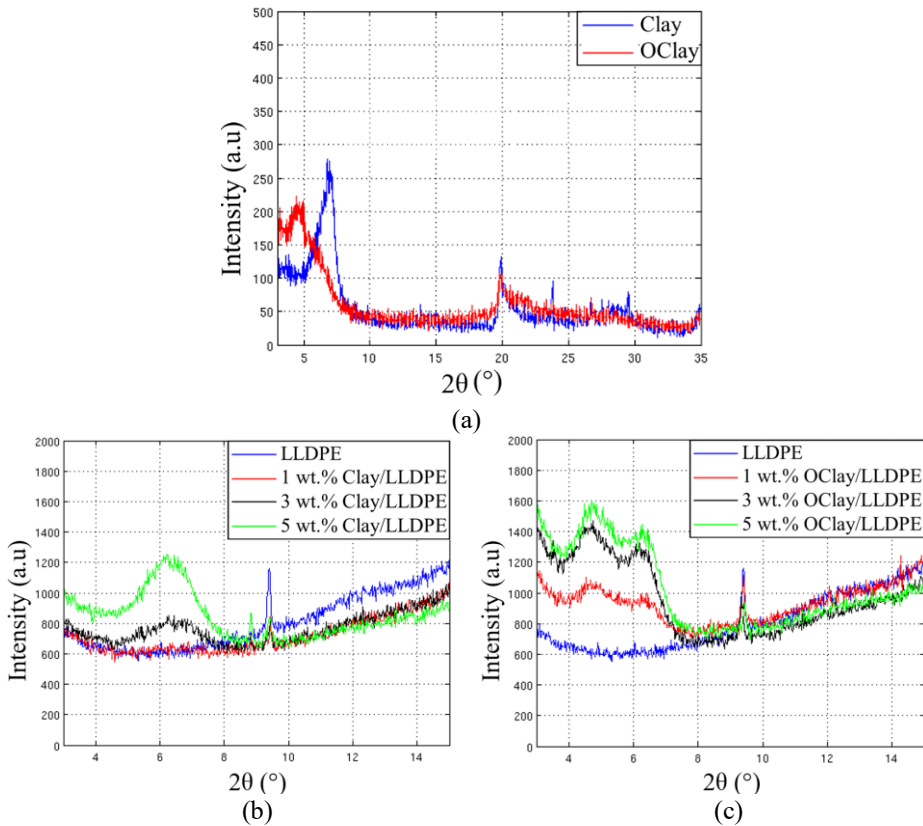


Figure 1. XRD Analyzing Results of a) Clay and OClay, b) LLDPE and Clay/LLDPE Nanocomposites, and c) LLDPE and OClay/LLDPE Nanocomposites

Due to surfactant interaction through cation exchange, the interlayer spacing of clay expanded from 1,26 nm to 3,65 nm (Figure 1a). In the Clay/LLDPE nanocomposites, polymer chains were intercalated between the clay layers, expanding the interlayer spacing from 1,26 nm to 1,47 nm (Figure 1b). For the OClay/LLDPE nanocomposites, the polymer chains similarly intercalated with the organoclay layers; however, interactions were more prevalent on the larger organophilic surfaces of OClay, resulting in LLDPE chains encapsulating the organoclay particles (Figure 1c). If exfoliation of additives within the LLDPE chains occurred, the crystalline peaks of additives would disappear in the characteristic crystalline peak regions of Clay and OClay. However, in both Clay and OClay samples, the XRD results indicate predominantly intercalated structures, as the additives' crystalline peaks remain visible in Figure 1. For both Clay and OClay, the intensity of the LLDPE crystalline peak slightly decreases inversely with the additive weight %, as shown in Figures 1b and Figure 1c.

Based on the DSC results given in Figure 2, the melting temperature of LLDPE was determined to be 129 $^{\circ}\text{C}$, with degradation beginning above 200 $^{\circ}\text{C}$. Accordingly, the optimal processing conditions were set at 180 $^{\circ}\text{C}$, mixing time of 7 minutes, and screw rotation speed of 50 rpm to prevent degradation and avoid air bubbles in the

composites. All LLDPE nanocomposites were prepared under these optimized conditions. In Figure 2, the heat flux (W/g, with endothermic reactions shown as upward peaks) is plotted vs. temperature up to 200 °C, as measured by DSC.

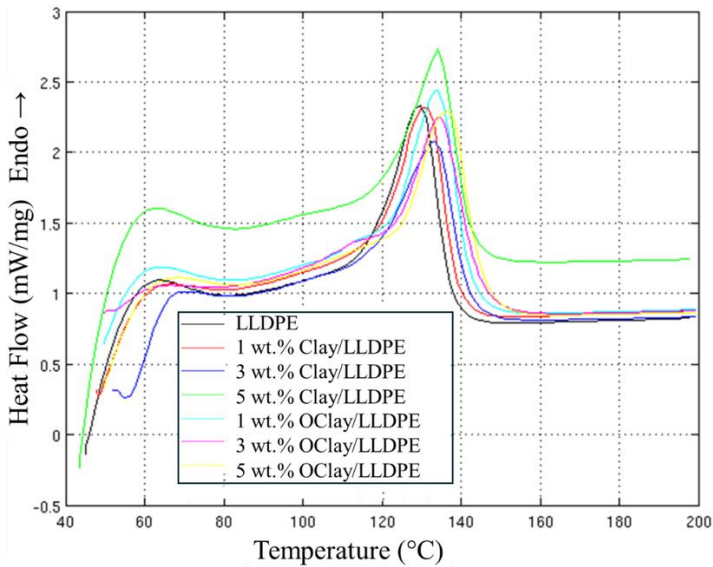


Figure 2. Heat Flux vs. Temperature Graphs of Pure LLDPE, Clay/LLDPE and OClay/LLDPE Nanocomposites

The derivatives of the DSC curves were analyzed to determine the transition temperatures. The melting temperature of pure LLDPE was found to be 129,8 °C. With the addition of clay at concentrations of 1, 3, and 5 wt.%, the melting temperature increased to 130,9, 132,5, and 134,1 °C, respectively. When OClay was added to LLDPE in the same concentrations, the melting temperature increased slightly more, shifting to 133,8, 134,3, and 136,3 °C, respectively. As a result, the melting temperature of LLDPE is improved 5 % with addition 5 wt.% of OClay.

The FTIR spectrum of LLDPE, and its composites are given in Figure 3.

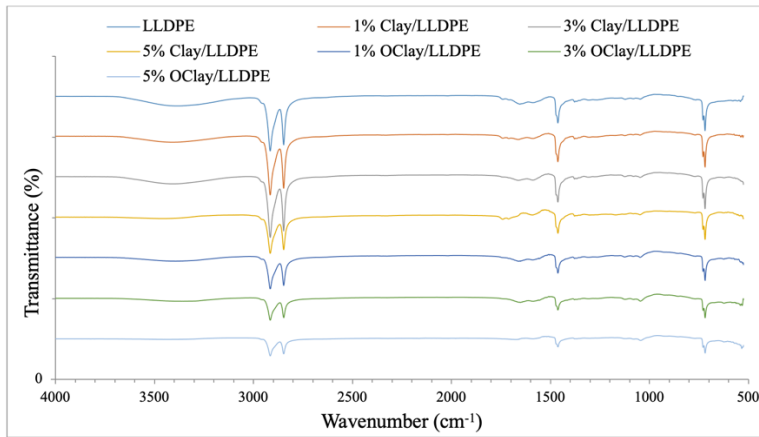


Figure 3. FTIR Results of Pure LLDPE, Clay/LLDPE and OClay/LLDPE Nanocomposites

Analyzing FTIR spectrums, the characteristic peaks band of LLDPE and its composites are given in Table 2.

Table 2. FTIR Results of Pure LLDPE, Clay/LLDPE and OClay/LLDPE Nanocomposites

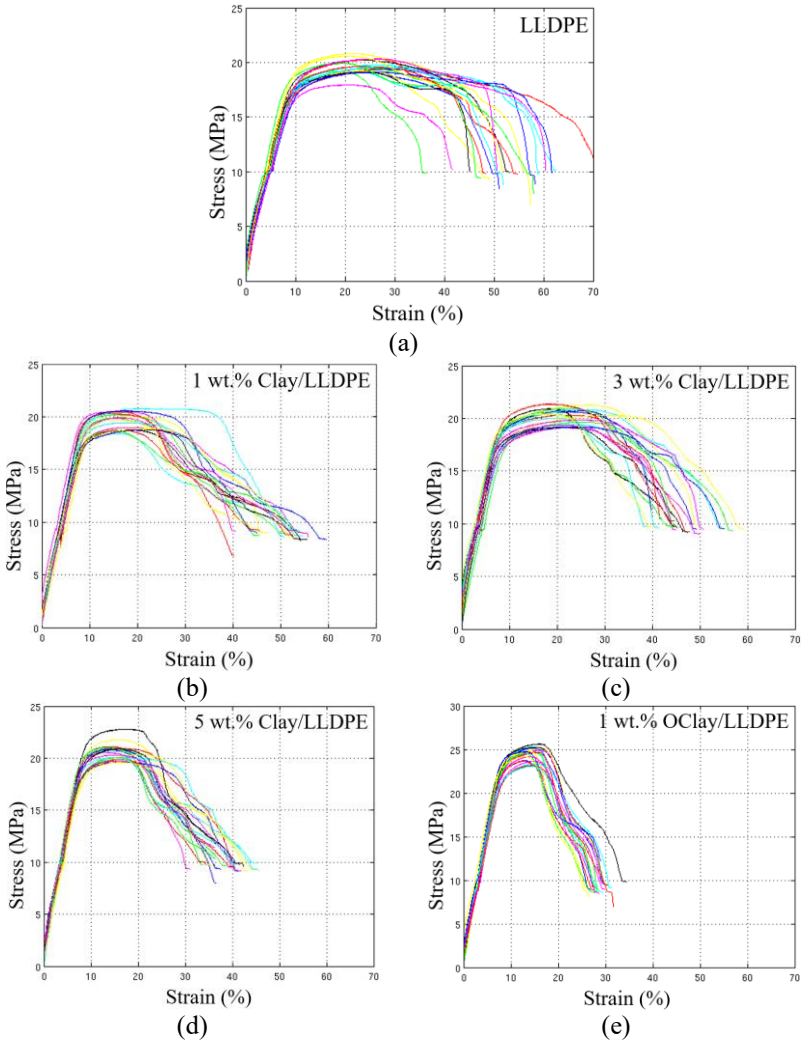
| Amount of additive | H-OH | C-H | C-H | H-O-H | C=C | C-C | C-C | Si-O | C-H | Al-OH | Si-O |
|--------------------|------------|------|------|-----------|------------|------|------|------------|-----|---------|------|
| 0 | 3384-3386 | 2916 | 2848 | 1654 | 1587 -1591 | 1462 | 1378 | - | 719 | - | - |
| 1 wt.% Clay | 3404-3409 | 2916 | 2848 | 1660-1666 | 1588 -1592 | 1462 | 1378 | 1048 -1048 | 719 | 631-632 | 525 |
| 3 wt.% Clay | 3407-3411 | 2916 | 2848 | 1660 | 1588 -1591 | 1462 | 1378 | 1046 -1048 | 719 | 624-625 | 525 |
| 5 wt.% Clay | 3457- 3459 | 2916 | 2848 | 1711 | 1591 -1593 | 1462 | 1378 | 1048 -1048 | 719 | 628 | 525 |
| 1 wt.% OClay | 3388-3405 | 2916 | 2848 | 1651 | 1588 -1592 | 1462 | 1378 | 1046 -1047 | 719 | 623-625 | 525 |
| 3 wt.% OClay | 3352-3366 | 2916 | 2848 | 1651 | 1587 -1588 | 1462 | 1378 | 1045 -1046 | 719 | 622-622 | 525 |
| 5 wt.% OClay | 3427-3445 | 2916 | 2848 | 1651 | 1586 -1592 | 1462 | 1378 | 1044 -1045 | 719 | 625 | 525 |

According to Table 2, the FTIR spectrum of pure LLDPE shows the characteristic CH_2 asymmetric and symmetric stretching bands, with peaks at 2916 cm^{-1} and 2848 cm^{-1} , respectively. The peak at 1462 cm^{-1} was attributed to the bending deformation of the C-H bond. The CH_3 symmetric deformation band appeared at 1378 cm^{-1} and the C-H rocking deformation occurs at 719 cm^{-1} . (Gulmine et al. 2002)

For the clay and organoclay, the shifts around $621 - 630 \text{ cm}^{-1}$ indicated the presence of central cations (such as Mg) in the octahedral sheet. Peaks in the range of $1045-1050 \text{ cm}^{-1}$ were associated with the stretching of Si-O bonds. A strong peak at 525 cm^{-1} is attributed to the Si-O-Al bending (Madejova 2003; Durmus & Macosko, 2007). Characteristic absorption peaks of the clay structure are shifted in the FTIR spectrum of the LLDPE nanocomposites, suggesting an interaction between the LLDPE chains and clay layers. In Table 2, a broad band $3351 - 3459 \text{ cm}^{-1}$, observed clearly in the spectra of montmorillonite is due to hydrogen bond between LLDPE branches and H-O-H vibrations of adsorbed water.

3.2. The Mechanical Testing

Testometric M350-10CT was used for the tensile tests of pure LLDPE and its composites following ASTM638 standard and each test was repeated twenty times. The mechanical properties such as elastic modulus, yield strength, tensile strength, tensile strain, elastic storage energy (resilience) and durability of materials (toughness) are determined from the stress-strain diagrams of LLDPE (Figure 4a), Clay/LLDPE nanocomposites (Figure 4b-d), and OClay/LLDPE nanocomposites (Figure 4e-g).



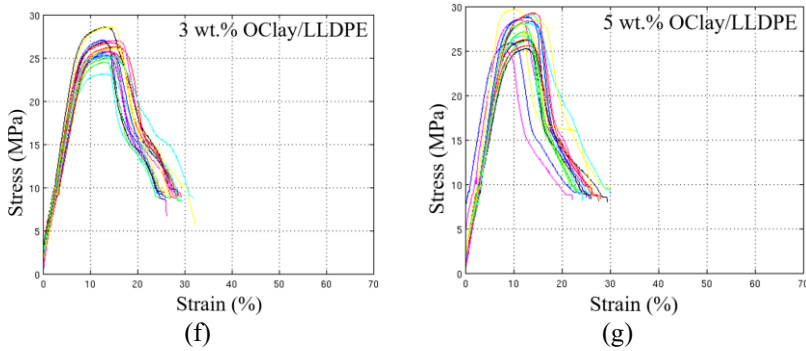


Figure 4. The tensile stress – strain diagram of samples for a) LLDPE, b) 1 wt.% Clay/LLDPE, c) 3 wt.% Clay/LLDPE, d) 5 wt.% Clay/LLDPE, e) 1 wt.% OClay/LLDPE, f) 3 wt.% OClay/LLDPE, g) 5 wt.% OClay/LLDPE nanocomposites.

The tensile (elastic) modulus of the samples was determined by the slope of linear portion in elastic region of the curves. The yield point is the where noticeable plastic deformation starts on the stress-strain graph leaving from the linearity. The yield strength is the stress value at the yield point. Tensile strength is the maximum stress of the samples under the applied load, and corresponding strain is called tensile strain. The stored elastic energy is called resilience which is the area under the stress-strain up to yield point, and stored energy up to rupture is called toughness which is the area under the stress-strain curve up to failure. Stiffness, the resistance to elastic deformation, is the key parameter for many applications of LLDPE measured by elastic modulus, higher resilience means better stiffness.

The resistance to localized plastic deformation of LLDPE and its nanocomposites was determined through hardness testing, with the results presented in Figure 5. The type and amount of filler had a slight effect on the hardness values of LLDPE. The observed variability in hardness can be attributed to factors such as minor inconsistencies in filler dispersion during the mixing process or localized microstructural differences within the composite matrix, including variations between amorphous and crystalline regions. To ensure reliable measurements, all samples were carefully examined under an optical microscope prior to testing, and any specimens containing air bubbles were excluded. As a result, air bubbles are not considered a contributing factor to the observed spread in values. The variability is more pronounced at lower filler concentrations, likely due to greater challenges in achieving complete homogeneity in the composite matrix, which may also influence mechanical properties.

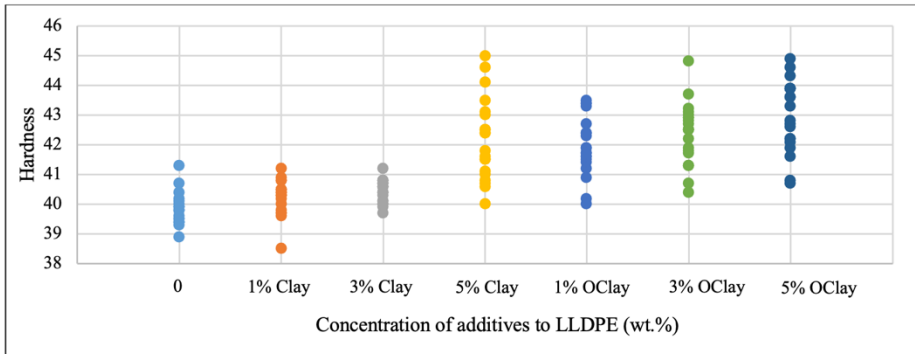


Figure 5. Shore D hardness values of pure LLDPE and its nanocomposites

All twenty samples of each LLDPE and its nanocomposites were examined from their stress-strain diagram, the results are given in Table 3 including their standard deviations for each mechanical property, and hardness values.

Table 3. Mechanical Properties of LLDPE and LLDPE Nanocomposites

| Additives to LLDPE | Elastic Modulus (MPa) | Yield Strength (MPa) | Tensile Strength (MPa) | Tensile Strain (%) | Resilience (MPa) | Toughness (MPa) | Hardness |
|--------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|--------------------|------------------|-----------------|------------|
| 0 | 195,89±8,88 | 9,79±0,44 | 19,63±0,65 | 17,82±2,64 | 0,24±0,01 | 8,85±1,50 | 39,84±0,54 |
| 1 wt.% Clay | 218,77±12,44 | 11,01±0,89 | 19,85±0,90 | 17,15±1,69 | 0,27±0,02 | 8,16±0,75 | 40,24±0,59 |
| 3 wt.% Clay | 224,89±11,83 | 11,12±0,68 | 20,18±0,74 | 15,70±1,86 | 0,28±0,01 | 7,84±0,97 | 40,44±0,38 |
| 5 wt.% Clay | 236,78±10,76 | 11,68±0,64 | 20,63±0,78 | 13,14±1,35 | 0,30±0,01 | 6,16±0,64 | 42,18±1,38 |
| 1 wt.% OClay | 277,45±14,02 | 12,49±4,33 | 24,44±0,76 | 9,73±0,64 | 0,35±0,02 | 5,09±0,45 | 41,95±1,00 |
| 3 wt.% OClay | 294,11±24,21 | 14,71±1,21 | 26,01±1,27 | 9,23±0,73 | 0,37±0,03 | 4,86±0,46 | 42,40±1,03 |
| 5 wt.% OClay | 310,81±28,15 | 15,54±1,41 | 27,39±1,43 | 8,67±0,74 | 0,39±0,04 | 4,50±0,55 | 42,98±1,21 |

By addition of Clay and OClay up to 5 wt.% significantly most mechanical properties of LLDPE, except for tensile strain and toughness. Specifically, the addition of 5 wt.% Clay enhanced the elastic modulus, yield strength, tensile strength, resilience, and hardness of LLDPE by 20,87%, 19,31%, 5,09%, 25,00%, and 5,87 %, respectively. Similarly, incorporating 5 wt.% OClay increased these properties by 56,67%, 58,73%, 39,53%, 62,50%, and 7,88%, respectively. The stiffness of LLDPE evaluated based on elastic modulus improved from 195,89 MPa to 310,81MPa is the key parameter for many applications as given in Figure 6. 58,67% improvement on LLDPE's stiffness without using any compatibilizers or modifiers, just by adding 5 wt.% organoclay is a huge effect comparing to previous works done by other researchers (Hotta & Paul, 2004). However, tensile strain and toughness of LLDPE decreased by 26,27% and 30,40% with 5 wt.% Clay, and by 51,38% and 49,15% with 5 wt.% of OClay.

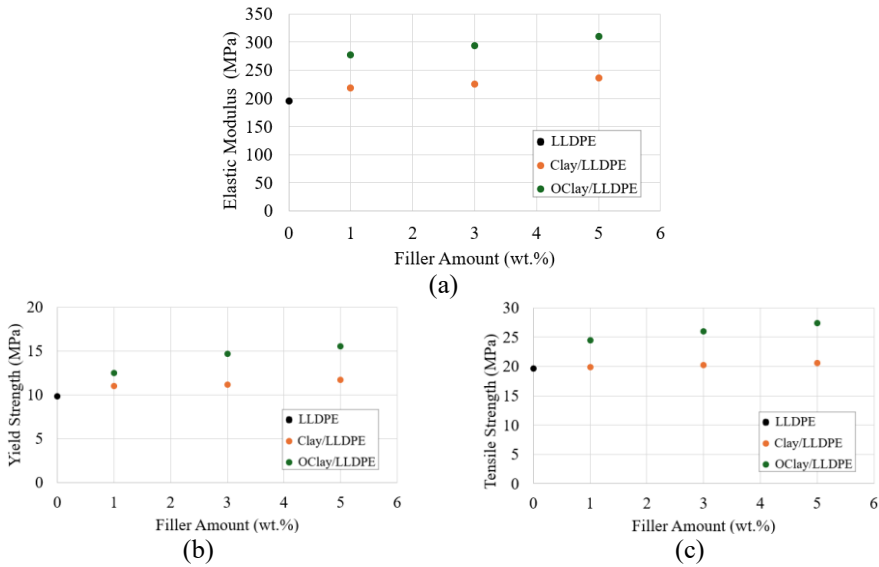


Figure 6. Comparison of a) Elastic Modulus, b) Yield Strength, and c) Tensile Strength of LLDPE and LLDPE Nanocomposites

The ANOVA results confirm that filler type, filler amount, and their interaction significantly influence the mechanical properties of LLDPE composites, with all p-values far below 0,05, providing strong evidence against the null hypothesis (Table 4). Among these factors, filler amount exhibits the strongest effect, as indicated by the highest F-values across elastic modulus ($F = 13208,16$), yield strength ($F = 2412,40$), and tensile strength ($F = 26703,41$), highlighting its dominant role in enhancing mechanical performance. Filler type also shows a notable effect, with F-values ranging from 59,23 to 191,11, while the interaction between filler type and filler amount, though statistically significant (F-values from 47,53 to 87,43), has a comparatively smaller influence. P-values are presented in scientific notation (e.g., $p < 1E-30$) to clearly convey their extreme significance. All p-values in Table 4 are well below conventional thresholds (e.g., 0,05 or 0,0001), underscoring the robust effects of filler type, filler amount, and their interaction on the mechanical properties of LLDPE composites. These findings highlight the critical role of optimizing filler amount to achieve improved mechanical properties in LLDPE composites.

Table 4. Analysis of Variance (ANOVA) for Elastic Modulus, Yield Strength and Tensile Strength of LLDPE and LLDPE Nanocomposites

| Source of Variation | Elastic Modulus | | Yield Strength | | Tensile Strength | |
|-----------------------------|-----------------|--------------|----------------|--------------|------------------|--------------|
| | F | P-value | F | P-value | F | P-value |
| Filler Type | 59,23 | $p < 0,001$ | 106,14 | $p < 0,001$ | 191,11 | $p < 0,001$ |
| Filler Amount | 13208,16 | $p < 0,0001$ | 2412,40 | $p < 0,0001$ | 26703,41 | $p < 0,0001$ |
| Filler Type x Filler Amount | 53,77 | $p < 0,001$ | 47,53 | $p < 0,001$ | 87,43 | $p < 0,001$ |

Organophilic clay (OClay) layers, due to their finer dispersion within the LLDPE matrix, interact more readily with the non-polar LLDPE chains than do hydrophilic clay (Clay) layers. This results in improved compatibility of OClay with the LLDPE matrix. However, both Clay and OClay dispersed in an intercalated rather than exfoliated in LLDPE matrix revealed by XRD results caused increment in the standard deviation for each mean value of improved properties. Consequently, OClay exhibited a more positive effect on the mechanical properties of LLDPE compared to Clay at the same amount of addition.

4. CONCLUSION

In this study, LLDPE nanocomposites were fabricated via melt intercalation using 1-5 wt.% of nanosized clay and organoclay to enhance mechanical properties. The results showed that increasing additive concentration improved mechanical strength, albeit with a slight decrease in flexibility. FTIR and XRD analyses confirmed homogeneous dispersion and interaction between the fillers and polymer chains. The ANOVA findings further revealed that both the type and amount of the fillers have a statistically significant effect ($p < 0,05$) on mechanical properties, providing a comprehensive understanding of the comparative performance of clay and organoclay at different levels. Specifically, organophilic organoclay exhibited superior interaction to the LLDPE matrix compared to hydrophilic clay, leading to greater mechanical enhancements. At 5 wt.% organoclay, the elastic modulus, yield strength, and tensile strength increased by 56,67%, 58,73%, and 39,53%, respectively. Additionally, the 5 wt.% OClay/LLDPE nanocomposite showed a 5% rise in melting temperature suggests expanded application potential in thermally demanding environments. Adding organoclay effectively enhances the durability of LLDPE and may help reduce microplastic generation, making it suitable for high-performance applications. Future studies could further explore its long-term stability and environmental resistance.

Funding

This work was conducted as part of the research project titled “*Polyethylene/Clay Nanocomposites*” (RAGS-09045) at Khalifa University (formerly known as The Petroleum Institute) in the UAE.

Contribution of the Authors

Ebru Gunister: Conception, literature review, preparation and characterization of materials, analysis, and interpretation, writing, editing and funding.

Edgar Alejandro Ayala Iracheta: Preparation, testing, analysis, writing and editing.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no potential conflict of interest for this manuscript.

Research and Publication Ethics Statement

Research and publication ethics were observed in this study.

REFERENCES

- As'Habi, L., Jafari, S. H., Khonakdar, H. A., Kretzschmar, B., Wagenknecht, U., & Heinrich, G. (2013). Effect of clay type and polymer matrix on microstructure and tensile properties of PLA/LLDPE/clay nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 130(2), 749–758.
- Canbaz, E. G., & Güngör, N. (2009). Kil/Kitosan ve Organokil/Kitosan nanokompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonu [Production and characterization of Clay/Chitosan and Organoclay/Chitosan nanocomposites]. *ITU Journal Series C: Basic Sciences*, 7(1), 45–53.
- Durmus, A., Kasgoz, A., & Macosko, C. W. (2007). Linear low-density polyethylene (LLDPE)/clay nanocomposites. Part I: Structural characterization and quantifying clay dispersion by melt rheology. *Polymer*, 48(15), 4492–4502.
- Gulmine, J.V., Janissek, P.R., Heise, H.M., Akcelrud, L., (2002). Polyethylene characterization by FTIR, *Polymer Testing*, 21(5), 557-563.
- Gunister, E., Alemdar, S. A., & Güngör, N. (2004). Effect of sodium dodecyl sulfate on flow and electrokinetic properties of Na-activated bentonite dispersions. *Bulletin of Materials Science*, 27, 317–322.
- Hotta, S., & Paul, D. R. (2004). Nanocomposites formed from linear low-density polyethylene and organoclays. *Polymer*, 45, 7639–7654.
- Kontou, E., & Niaounakis, M. (2006). Thermo-mechanical properties of LLDPE/SiO₂ nanocomposites. *Polymer*, 47(4), 1267–1280.
- LeBaron, P. C., Wang, Z., & Pinnavaia, T. J. (1999). Polymer-layered silicate nanocomposites: An overview. *Applied Clay Science*, 15(1–2), 11–29.
- Li, J., Gunister, E., & Barsoum, I. (2019). Effect of graphene oxide as a filler material on the mechanical properties of LLDPE nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 53(19), 2761–2773.
- Liu, M., Horrocks, A.R, (2002). Effect of Carbon Black on UV stability of LLDPE films under artificial weathering conditions, *Polymer Degradation and Stability*, 75(3), 485-499.
- Madejova, J., (2003), FTIR techniques in clay mineral studies, *Vibrational Spectroscopy*, 31, 1-10.
- Mansoor, Z., Kowalczyk, M., Adamus, G., Manning, G., Parati, M., Radecka, I., & Khan, H. (2021). Polymers Use as Mulch Films in Agriculture—A Review of History, Problems and Current Trends. *Polymers*, 14(23), 5062.

- Mezghani, K., Farooqui, M., Furquan, S., Atieh, M., (2011). Influence of carbon nanotube (CNT) on the mechanical properties of LLDPE/CNT nanocomposite fibers, *Materials Letters*, 65(23-24), 3633-3635.
- Mir, S., Asghar, B., Khan, A. K., Rashid, R., Shaikh, A. J., Khan, R. A., & Murtaza, G. (2017). The effects of nanoclay on thermal, mechanical, and rheological properties of LLDPE/chitosan blend. *Journal of Polymer Engineering*, 37(2), 143–149.
- Mousavi, S. M., Aghili, A., Hashemi, S. A., Goudarzian, N., Bakhoda, Z., & Baseri, S. (2016). Improved morphology and properties of nanocomposites, linear low-density polyethylene, ethylene-co-vinyl acetate, and nano clay particles by electron beam. *Polymers from Renewable Resources*, 7(4), 135–154.
- Peacock, A.J. (2000). Handbook of Polyethylene: Structures, Properties, and Applications. *CRC Press*.
- Sabetzadeh, M., Bagheri, R., & Masoomi, M. (2016). Effect of nanoclay on the properties of low-density polyethylene/linear low-density polyethylene/thermoplastic starch blend films. *Carbohydrate Polymers*, 141, 75–81.
- Said, M., Challita, G., & Seif, S. (2020). Development of blown film linear low-density polyethylene-clay nanocomposites: Part B: Mechanical and rheological characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(16), Article 48590.
- Stoeffler, K., Lafleur, P. G., Perrin-Sarazin, F., Bureau, M. N., & Denault, J. (2011). Micro-mechanisms of deformation in polyethylene/clay micro- and nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(8), 916–927.
- Yassin, A., & Günister, E. (2023). Optimization of thermal and rheological properties of HDPE-organoclay composite using response surface methodology. *Gazi University Journal of Science*, 36(1), 322-334.
- Wadgaonkar, K., & Mehta, L. (2019). Enhancement of mechanical and barrier properties of LLDPE composite film via PET fiber incorporation for agricultural application. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(5), 1031–1039.