



ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY

JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT

ISSN 2630-6433 e-ISSN 2630-6433

# JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT

**YEAR: 2024**

**VOLUME: 8**

**NUMBER: 1**



ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY

JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT

ISSN 2630-6433 e-ISSN 2630-6433

**Owner / Sahibi**

Prof. Dr. Mete Gündoğan, Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Turkey

[metegundogan@ybu.edu.tr](mailto:metegundogan@ybu.edu.tr)

**General Publication Management / Genel Yayın Yönetimi**

Prof. Dr. Ergün Eraslan, Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Turkey

[eraslan@ybu.edu.tr](mailto:eraslan@ybu.edu.tr)

**Editor-in-Chief / Editör**

Assoc. Prof. Dr. Babek Erdebili (B.D. Rouyendegh), Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Ankara, Turkey

[babek.erdebili2015@gmail.com](mailto:babek.erdebili2015@gmail.com) or [berdebili@ybu.edu.tr](mailto:berdebili@ybu.edu.tr)

**Editorial Board / Editör Kurulu**

Prof. Dr. Gerhard-Wilhelm Weber	Chair of Marketing and Economic Engineering, Poznan University of Technology, Poland	<a href="mailto:gerhard.weber@put.poznan.pl">gerhard.weber@put.poznan.pl</a>
Prof. Dr. Vikas Kumar	Operations and Supply Chain Management, University of the West of England, UK	<a href="mailto:Vikas.Kumar@uwe.ac.uk">Vikas.Kumar@uwe.ac.uk</a>
Prof. Dr. Ali Allahverdi	Department of Industrial and Systems Management, Kuwait University, Kuwait	<a href="mailto:ali.allahverdi@ku.edu.kw">ali.allahverdi@ku.edu.kw</a>
Prof. Dr. Yusuf Tansel İç	Department of Industrial Engineering, Baskent University, Turkey	<a href="mailto:yustanic@baskent.edu.tr">yustanic@baskent.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Gülin Feryal Can	Department of Industrial Engineering, Baskent University, Turkey	<a href="mailto:gfcan@baskent.edu.tr">gfcan@baskent.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Hamid Reza Navidi	Department of Applied Mathematics, Shahed University, Iran	<a href="mailto:navidi@shahed.ac.ir">navidi@shahed.ac.ir</a>
Assoc. Prof. Dr. Fatih Emre Boran	Department of Industrial Engineering, Gazi University, Turkey	<a href="mailto:emreboran@gazi.edu.tr">emreboran@gazi.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Sena Emre Daş	Department of Industrial Engineering, Kırıkkale University, Turkey	<a href="mailto:senadas@kku.edu.tr">senadas@kku.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Atour Taghipour	Department of International Management, Normandy University, France	<a href="mailto:atour.tahipour@univ-lehavre.fr">atour.tahipour@univ-lehavre.fr</a>
Assoc. Prof. Dr. Elif Kılıç Delice	Department of Industrial Engineering, Atatürk University, Turkey	<a href="mailto:elif.kdelice@atauni.edu.tr">elif.kdelice@atauni.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Yucel Yılmaz Ozturkoglu	Department of Logistics Management, Yasar University, Turkey	<a href="mailto:yucel.ozturkoglu@yasar.edu.tr">yucel.ozturkoglu@yasar.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Dilek Yılmaz	Department of Industrial Engineering, Istanbul University, Turkey	<a href="mailto:dborekci@istanbul.edu.tr">dborekci@istanbul.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. İbrahim Küçükkoç	Department of Industrial Engineering, Balıkesir University, Turkey	<a href="mailto:ikucukkoc@balikesir.edu.tr">ikucukkoc@balikesir.edu.tr</a>
Assoc. Prof. Dr. Nasr Hamood Mohamed Al-Hinai	Department of Mechanical and Industrial Engineering, College of Engineering Sultan Qaboos University, Oman	<a href="mailto:nhinai@squ.edu.om">nhinai@squ.edu.om</a>
Assoc. Prof. Dr. Burcu Özcan	Department of Industrial Engineering, Kocaeli University, Turkey	<a href="mailto:burcu.ozcan@kocaeli.edu.tr">burcu.ozcan@kocaeli.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Mahdi Fathi	Department of Information Technology and Decision Sciences, University of North Texas, USA	<a href="mailto:mahdi.fathi@unt.edu">mahdi.fathi@unt.edu</a>



## ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY

### JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT

ISSN 2630-6433 e-ISSN 2630-6433

Asst. Prof. Dr. Borzou Rostami	Lazaridis School of Business and Economics at Wilfrid Laurier University, Canada	<a href="mailto:brostami@wlu.ca">brostami@wlu.ca</a>
Asst. Prof. Dr. Mojtaba Ghiyasi	Faculty of Industrial and Management, Shahrood University, Iran	<a href="mailto:mog@shahroodut.ac.ir">mog@shahroodut.ac.ir</a>
Asst. Prof. Dr. Mohsen Afsharian	Institute of Management Control and Business Accounting, Technische Universitat Braunschweig, Germany	<a href="mailto:m.afsharian@tu-braunschweig.de">m.afsharian@tu-braunschweig.de</a>
Asst. Prof. Dr. Hamidreza Ahady Dolatsara	School of Management, Clark University, USA	<a href="mailto:hahadydolatsara@clarku.edu">hahadydolatsara@clarku.edu</a>
Asst. Prof. Dr. Farzad Sattari Ardebili	Department of Management, Azad Ardebil University, Iran	<a href="mailto:farzadsattari@yahoo.com">farzadsattari@yahoo.com</a>
Asst. Prof. Dr. Zahra Sedighi Maman	Decision Sciences and Marketing, Adelphi University, USA	<a href="mailto:zmaman@adelphi.edu">zmaman@adelphi.edu</a>
Asst. Prof. Dr. Nasrin Mohabbati	Department of Information and Decision Sciences, California State University, USA	<a href="mailto:nasrin.mohabbati@csusb.edu">nasrin.mohabbati@csusb.edu</a>
Asst. Prof. Dr. Reza Kiani Mavi	School of Business and Law, Edith Cowan University, Australia	<a href="mailto:r.kianimavi@ecu.edu.au">r.kianimavi@ecu.edu.au</a>
Asst. Prof. Dr. Beata Mrugalska	Faculty of Engineering Management, Poznan University of Technology, Poland	<a href="mailto:beata.mrugalska@put.poznan.pl">beata.mrugalska@put.poznan.pl</a>
Asst. Prof. Dr. Erdal Aydemir	Department of Industrial Engineering, Suleyman Demirel University, Turkey	<a href="mailto:erdalaydemir@sdu.edu.tr">erdalaydemir@sdu.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Zeynep Ertem	Marshall School of Business, University of Southern California, USA	<a href="mailto:zeynepertem@gmail.com">zeynepertem@gmail.com</a>
Asst. Prof. Dr. Yavuz Selim Özdemir	Department of Industrial Engineering, Ankara Bilim University, Turkey	<a href="mailto:yavuz.selim.ozdemir@ankarabilim.edu.tr">yavuz.selim.ozdemir@ankarabilim.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Nuzhat Sadriwala	Department of Accounting, Manikyalal Verma Shramjeevi College, India	<a href="mailto:sadriwalanuzhat@gmail.com">sadriwalanuzhat@gmail.com</a>
Asst. Prof. Dr. Ahmet Çalık	Institute of Graduate Education, KTO Karatay University, Turkey	<a href="mailto:ahmet.calik@karatay.edu.tr">ahmet.calik@karatay.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Abdullah Yıldızbaşı	Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazıt University, Turkey	<a href="mailto:ayildizbasi@ybu.edu.tr">ayildizbasi@ybu.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Sercan Demir	Department of Industrial Engineering, Harran University, Turkey	<a href="mailto:sercandemir@harran.edu.tr">sercandemir@harran.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. Gerçek Budak	Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazıt University, Turkey	<a href="mailto:gbudak@ybu.edu.tr">gbudak@ybu.edu.tr</a>
Asst. Prof. Dr. İbrahim Yılmaz	Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazıt University, Turkey	<a href="mailto:iyilmaz@ybu.edu.tr">iyilmaz@ybu.edu.tr</a>
Dr. Amir Mohammad Fathollahi-Fard	École de Technologie Supérieure, University of Québec, Canada	<a href="mailto:amir-mohammad.fathollahi-fard.1@ens.etsmtl.ca">amir-mohammad.fathollahi-fard.1@ens.etsmtl.ca</a>
Dr. Fateme Marandi	Department of Industrial Engineering and Management Systems, Amirkabir University of Technology, Iran	<a href="mailto:fatem.marandi@aut.ac.ir">fatem.marandi@aut.ac.ir</a>
Dr. Rameshwar Dubey	Liverpool Business School, Liverpool John Moores University, UK	<a href="mailto:r.dubey@ljmu.ac.uk">r.dubey@ljmu.ac.uk</a>
Dr. Saeedeh Parsaeefard	Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Canada	<a href="mailto:saeidah.fard@utoronto.ca">saeidah.fard@utoronto.ca</a>
Dr. Menekşe Salar Barım	Research Industrial Engineer, National Institute for Occupational Safety and Health, USA	<a href="mailto:mzs0053@auburn.edu">mzs0053@auburn.edu</a>
Dr. Adem Pınar,	Logistics and Strategic Planner, Turkish Armed Forces, Turkey	<a href="mailto:adempinar@yahoo.com">adempinar@yahoo.com</a>
Inst. Nihan Çağlayan	Department of Management and Organization, Ahi Evran University, Turkey	<a href="mailto:nihancaglayan@ahievran.edu.tr">nihancaglayan@ahievran.edu.tr</a>
Res. Asst. Selin Çabuk	Department of Industrial Engineering, Cukurova University, Turkey	<a href="mailto:selincabuk@cu.edu.tr">selincabuk@cu.edu.tr</a>

#### Advisory Board / Danışma Kurulu



## ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY

### JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT

ISSN 2630-6433 e-ISSN 2630-6433

Prof. Dr. Mete Gündoğan	Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Turkey	<a href="mailto:metegundogan@ybu.edu.tr">metegundogan@ybu.edu.tr</a>
Prof. Dr. Ergün Eraslan	Department of Industrial Engineering, Ankara Yildirim Beyazit University, Turkey	<a href="mailto:eraslan@ybu.edu.tr">eraslan@ybu.edu.tr</a>
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Department of Industrial Engineering, Erciyes University, Turkey	<a href="mailto:ekaydogan@erciyes.edu.tr">ekaydogan@erciyes.edu.tr</a>
Prof. Dr. Tahir Hanalioğlu	Department of Industrial Engineering, TOBB ETU University, Turkey	<a href="mailto:tahirkhaniyev@etu.edu.tr">tahirkhaniyev@etu.edu.tr</a>
Prof. Dr. Mehmet Kabak	Department of Industrial Engineering, Gazi University, Turkey	<a href="mailto:mkabak@gazi.edu.tr">mkabak@gazi.edu.tr</a>
Prof. Dr. Serpil Erol	Department of Industrial Engineering, Gazi University, Turkey	<a href="mailto:serpiler@gazi.edu.tr">serpiler@gazi.edu.tr</a>
Prof. Dr. Orhan Torkul	Department of Industrial Engineering, Sakarya University, Turkey	<a href="mailto:torkul@sakarya.edu.tr">torkul@sakarya.edu.tr</a>
Prof. Dr. Turan Paksoy	Department of Aviation Management, Selçuk University, Turkey	<a href="mailto:dr.tpaksoy@gmail.com">dr.tpaksoy@gmail.com</a>
Prof. Dr. Hadi Gökçen	Department of Industrial Engineering, Gazi University, Turkey	<a href="mailto:hgokcen@gazi.edu.tr">hgokcen@gazi.edu.tr</a>





**ANKARA YILDIRIM BEYAZIT UNIVERSITY**  
**JOURNAL OF TURKISH OPERATIONS MANAGEMENT**

**ISSN 2630-6433 e-ISSN 2630-6433**

Journal of Turkish Operations Management (JTOM) issued by Ankara Yıldırım Beyazıt University (AYBU) is an international peer-reviewed online academic journal published in English, Turkish, Farsi and Arabic in all fields of industrial engineering for any query. JTOM addresses the theoretical framework, models, computational studies, and conceptual development of operations research together with current developments and practices. This journal combines the high standards of a traditional academic approach with the practical value of applications. Hence, JTOM aims to create an academical platform for the exchange of ideas and the presentation of new achievement in theory and application, wherever engineering and science meet the administrative and economic environment by applying operational research, and constructive suggestions on optimizing the current resources.

### **Current Publication Schedule**

The journal published two times per year (June-December). The journal covers theoretical and some applied aspects of science and technology and informs the reader of new trends in basic science and technology. JTOM accepts submissions in the form of research articles, review articles, and short notes.

### **Manuscript Evaluation Process**

The journal uses an online submission system through DergiPark®. The manuscript, along with all the files, is uploaded to DergiPark® online submission system which is available at the link <https://dergipark.org.tr/en/pub/jtom>

### **Open Access Policy**

The Journal is an open access journal which means that all content is freely available without charge to the user or his/her institution. Users are allowed to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of the articles in this journal without asking prior permission from the publisher or the author All articles published are available on the journal web page <https://aybu.edu.tr/jtom/> and also DergiPark® system <https://dergipark.org.tr/en/pub/jtom>

### **Publication Fees**

There is no submission, evaluation or publication fee for this journal. All accepted articles are freely available online upon publication.



INDEXING DATABASES

<b>Tr Dizin</b>	<b>EBSCO</b>	<b>WCOSJ</b>
<b>Root Indexing</b>	<b>Index of Copernicus</b>	<b>InfoBase Index</b>
<b>ASOS</b>	<b>Academic Journal Index</b>	<b>ResearchBib</b>
<b>Google Scholar</b>	<b>SOBIAD</b>	<b>ROAD</b>
<b>MIAR</b>	<b>ESJI</b>	<b>ERIHPLUS</b>
<b>DergiPark</b>	<b>Scholar Article Journal Index</b>	<b>DRJI</b>



CONTENTS / İÇİNDEKİLER

**Research Articles / Araştırma Makaleleri**

- COVID-19 Pandemisinin Türkiye Mobil Oyun Pazarına Etkisi: Bir Metin Madenciliği Uygulaması 1-19  
**Cigdem Kadaifci Cafer Erhan Bozdağ Erkan Işıklı**
- Proje çizelgelemede bulanık doğrusal programlama ile yeni bir yöntem önerisi: Yazılım projesinde uygulama 20-38  
**Vildan Çorumlu Kumru Didem Atalay Esra Dinler**
- Prevention of Occupational Accidents and Occupational Diseases with Supervised Machine Learning Algorithms: Different Sector Applications 39-59  
**Adnan Karabulut Mehmet Baran Ergun Eraslan**
- Sosyal medya reklam platformu seçimi üzerine yeni bir oyun - teorik yaklaşım 60-72  
**Furkan Göktaş Mehmet Gökerik**
- Nesnelerin İnterneti, Uygulama Alanları ve İş Sağlığı ve Güvenliği İle Etkileşimi 73-89  
**Merve Erol Ergün Eraslan**
- Scheduling parallel batch processing machines: A case study in the semiconductor industry 90-105  
**Şeyda Topaloğlu Yıldız Ezgi Güleç**
- Implement a Process Safety Management System Based on the Identification of the most Critical Factors in the Establishment of Safety Programs, Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process 106-119  
**Mazdak Khodadadi-karimvand Zahra Sojoudi Hamidreza Zakeri**
- State-of-the-art literature review on green finance with tabular-graphical and network analyses 120-139  
**Elif Haktanır Aktaş Cengiz Kahraman**
- Havaya setlerin seçimi için karşılaştırmalı çok kriterli karar verme yaklaşımı 140-156  
**Emre Yazıcı Ufukcan Ebiri Berat Alperen Kızılay Onur Oruç Hacı Mehmet Alakaş**
- Dijital dönüşümde proje yönetim sistemine yönelik bir araştırma: Bulanık AHP ve bulanık MAIRCA yaklaşımı 157-172  
**Emine Elif Nebati**
- Exploring the Relationship Between Technical and Comfort Factors in Designing Efficient Buildings: A Statistical Analysis of a Real-World Dataset 173-181  
**Nastaran Deljavan Hajar Franoudkia**



- Optimization of nanofiber diameter in the electrospinning of polyamide 6 by two-level factorial design 182-193  
**Deniz Efendioğlu Şerife Akkoyun**
- Akran Grup Durumları ve Oyun Teorisi ile Modellenmesi Üzerine 194-206  
**Medine Demir Pınar Usta Sırma Zeynep Alparslan Gök**
- Talebe dayalı malzeme ihtiyaç planlamaya dönüşüm süreci: Bir hazır giyim firmasında uygulama 207-214  
**Utkan Uluçağ**
- Yeşil iki-aşamalı araç rotalama problemi: Gerçek yol eğimini dikkate alan yakıt tüketimi hesaplaması 215-240  
**Ergül Kısa Toğrul**
- Assessment of Sustainable Aviation Fuel Production Methods: A Promethee II Approach 241-268  
**Ibrahim Temam Ibrahim Ali Osman Kusakci Amna Abdullah**
- Sanal Gerçeklik Uygulamalarında Bulanık Mantık Yaklaşımı: Sistemik Derleme 269-278  
**Azize Sudan Aran Ergün Eraslan**
- Assessing Column Stability: A Comparative Study of Machine Learning Regression Models for Shear Strength Prediction 279-289  
**Aybike Özyüksel Çiftçioğlu**
- Web of Science Veri Tabanında Bibliyometrik Bir Araştırma: İş Güvenliği Makaleleri 290-306  
**Hatice Özdemir Ramazan Kayabaşı**
- Nakit akım temelli finansal performans analizi için bir oyun-teorik yaklaşım: BIST otomotiv sektörü firmaları üzerine bir uygulama 307-321  
**Furkan Göktaş Meltem Ece Çokmutlu**



# Journal of Turkish Operations Management

## COVID-19 pandemisinin Türkiye mobil oyun pazarına etkisi: bir metin madenciliği uygulaması

Çiğdem Kadaifçi<sup>1</sup>, Erhan Bozdağ<sup>2</sup>, Erkan Işıklı<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34367, Maçka, Beşiktaş, İstanbul  
e-mail: kadaifci@itu.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-6900-5238>

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34367, Maçka, Beşiktaş, İstanbul  
e-mail: bozda@itu.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4522-9071>

<sup>3</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34367, Maçka, Beşiktaş, İstanbul  
e-mail: isiklie@itu.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-8319-8782>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 16.04.2023  
Revize: 25.09.2023  
Kabul: 03.10.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Mobil oyunlar,  
Metin madenciliği,  
Duygu analizi,  
Konu modellemesi,  
Uyum analizi

### Özet

Giderek hayatımızda daha büyük yer edinen dijital eğlence, müşteri deneyimi ve davranışlarının yakından izlenmesi gereken bir alan haline gelmiştir. Taşınabilirliği sayesinde insanların herhangi bir mekânda ve zamanda eğlenmesine olanak sağlayan mobil oyunlar, çocuklar kadar yetişkinlere de hitap ederek daha kazançlı hale gelmiş; böylelikle mobil oyun pazarı, küresel ölçekte son yıllarda daha fazla yatırım çekmeye başlamıştır. Teknolojik gelişmeler sayesinde mobil oyunlarda gözlenen hızlı büyüme eğilimi, COVID-19 pandemisi nedeniyle ivme kazanmıştır. Böyle dönüşüm şoklarının büyüme potansiyeli yüksek bir sektörü nasıl etkilediğini incelemek önemlidir. Pandeminin oyun pazarına olan etkisini, oyuncu davranışlarını inceleyerek ortaya koymayı amaçlayan bu çalışmada, belli bir oyun türüne ait Türkçe kullanıcı yorumları toplanmış, kullanıcıların pandemi öncesindeki ve sonrasındaki duyguları uyum analizi ve konu modellemesi sayesinde karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem de pandemi sonrasında öne çıkan sorunların ve konu başlıklarının pandemi öncesine kıyasla farklılaştığını ortaya koymaktadır. Tek bir türden kısıtlı sayıda oyun göz önünde bulundurularak uygulanan metodolojik çerçeve, farklı dillerde yazılmış yorumlara sahip başka oyunlara ve mobil uygulamalara da kolaylıkla uyarlanabilir.

## The impact of COVID-19 pandemic on the Turkish mobile gaming market: a text mining application

### Article Info

#### Article History:

Received: 16.04.2023  
Revised: 25.09.2023  
Accepted: 03.10.2023

#### Keywords:

Mobile games,  
Text mining,  
Sentiment analysis,  
Topic modeling,  
Correspondence analysis

### Abstract

As its prominence increases in our lives, digital entertainment is becoming an area where customer experience should be monitored more closely. The mobile gaming market has been attracting investments worldwide in recent years since mobile games allow both adults and children to have fun in any place and any time due to their portability and ease of access. The rapid growth trend observed in mobile games due to technological developments has accelerated during the COVID-19 pandemic. Examining how such major transformation shocks affect a market with a high growth potential is critical. Aiming to reveal the impact of the pandemic on the Turkish mobile gaming market, consumer reviews in a specific genre were collected, and how players' behavior were changed due to the pandemic were compared employing correspondence analysis and topic modeling. The findings of both techniques revealed that the problems and topics discussed during the pandemic differed from those detected before it. The proposed framework, which was employed considering a limited number of games that belonged to a specific genre, can be easily adapted to other games and mobile applications with consumer reviews written in different languages.

## 1. Giriş

Aralık 2019'da ilk kez Çin'in Wuhan eyaletinde görülen ve kısa sürede tüm dünyayı etkisi altına alan korona virüsün (COVID-19) ülke ekonomileri ve insan psikolojisi üzerinde yarattığı tahribat gün geçtikçe daha iyi anlaşılmaktadır. Bilginin anlık kaydedilip işlenebilmesini ve yayılmasını sağlayan dijital teknolojilerin arttığı bir dönemde ortaya çıkan ve hayatlarımızda kalıcı olması muhtemel çeşitli değişiklikler yaratan COVID-19 pandemisinin en olumlu etkilediği alanlar arasında dijital eğlence sektörü sayılabilir. Eğlence denilince, daha önceleri listenin ancak en sonunda yer alabilecek olan "oyunlar" artık hemen hemen herkesin günlük yaşamlarının vazgeçilmez bir parçası haline gelmiş durumdadır. Mobil, konsol veya bilgisayar aracılığıyla oyunlara temas eden kişi sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Bunun sonucunda oyunlar şekil değiştirip çeşitlenmektedir. Özellikle mobil ağların ve cihazların son on yıldaki çarpıcı gelişimi, mobil oyunlara olan ilgiyi artırmıştır. Taşınabilirliği ve gündelik özelliklerinden dolayı oyuncuların herhangi bir yerde ve zamanda eğlenmesine olanak tanıyan mobil oyunlar, giderek daha kazançlı hale gelmekte ve son yıllarda çok fazla yatırım çekmektedir. Pandemi sürecindeki toplu karantina uygulamalarının ve bireysel izolasyon dönemlerinin bu ilgiyi perçinleyip mobil oyunların kullanım sıklığını artırdığını, çeşitli demografik segmentleri kapsayarak kullanıcı kitlesini genişlettiğini söylemek mümkündür. Pandemiyle birlikte oyun oynama sıklığının arttığı ve alışkanlıklarının değiştiği (örneğin; tek kullanıcı oyunlardan çok kullanıcı çevrim içi oyunlara doğru eğilim gösterme) ulusal ve uluslararası platformda yapılan araştırmalarla desteklenmektedir (Barr ve Copeland-Stewart, 2022; Küçükvardar ve Türel, 2022). Oyun pazarının bu bölümünün yakın gelecekte dünya genelinde daha da hızlı büyüyeceği öngörülmektedir (Wijman, 2021).

Oyun geliştiricilerin, artan mobil oyuncu sayısı ile birlikte rekabetin daha da zorlaştığı bu ortamda, pazardan daha büyük bir pay almak için ürün çeşitliliğini artırırken, beklentileri farklı olabileceğinden, oyuncuların seslerini de duymaları gerekmektedir. Bu durum, artan mobil telefon sahibi ve internet kullanıcı sayısına paralel olarak tüm demografik segmentlerde mobil oyuncu sayısının arttığı Türkiye pazarı için de geçerlidir. 2021 yılında Türkiye'deki mobil oyuncu sayısı, 2019'a kıyasla yaklaşık 10 milyon artarak 43 milyona ulaşmıştır ("The Gaming Market in Turkey", 2022). Sektör raporları, Türkiye'deki yetişkinlerin yaklaşık %78'inin mobil oyunlar oynadığını, oyuncuların yaklaşık %46'sının ise haftada en az 10 saatini mobil oyun oynayarak geçirdiğini göstermektedir ("Gaming in Turkey Oyun ve Espor Ajansı", t.y.). Yeni yatırımlarla büyümeye devam eden Türkiye mobil oyun pazarının 2021 yılı gelirleri, bir önceki yıla kıyasla ABD doları bazında %38 artarak dünya genelinde 18. sıraya yerleşmiştir ("Gaming in Turkey Oyun ve Espor Ajansı", t.y.).

Yüksek ürün çeşitliliğinden dolayı rekabetin zor olduğu bu pazarda çoğunlukla benimsenen iş modeli, oyunların ücretsiz olarak sunulup reklamlar ve oyun-içi satın almalar sayesinde gelir elde edilmesi üzerine kuruludur. Bu yaklaşım, yeni oyuncuların bazen sadece birkaç gün içinde oyunu terk etmesine neden olmaktadır. Mobil oyun üreticilerinin başarısı için erken müşteri kaybının önlenmesi büyük öneme sahiptir. Oyuncuların ilgilendikleri bir oyunu başkalarının nasıl derecelendirdiği ve değerlendirdiğinden etkilendiği de bilinmektedir. Bu nedenlerden ötürü, oyuncu davranışını tahmin etmek, oyun analitiğindeki en temel ve yaygın zorluklardan biridir. Mobil oyunlar, belli bir demografik gruptaki hedef kitleye ulaşmak için en uygun araçlardan biri haline geldiğinden, oyun-marka iş birliklerinin kurulması açısından önemlidir. Nüfusunun hâlâ genç olduğu iddia edilebilecek Türkiye'de oyun oynamak, özellikle gençlerin hayatlarının bir parçası haline gelmiş durumdadır. Oyun geliştirmede rol oynayan bu parametrelere ek olarak pandeminin etkisiyle oyun tasarımında dikkat edilmesi gereken ek özellikler ortaya çıkmıştır. Mental sağlıklarını koruma, pandeminin olumsuz etkilerinden kaçma, sosyalleşme ve yürütülen kısıtlama uygulamaları sebebiyle hayatlarını "normalleştirme" kaygısıyla mobil oyunlara yönelim gösteren oyuncuları (Barr ve Copeland-Stewart, 2022) yakalayabilmek amacıyla hareket eden geliştiriciler oyun içeriğine yönelik turnuva, özel etkinlik, ödül gibi kullanıcıları yarıştıran sistemde tutacak özellikler, kullanıcı dostu geliştirmeler ve pandemiye yönelik farkındalığı arttıracak entegrasyonlar ile yönetsel açıdan yeni dijital oyun stratejileri geliştirmeye yönelmişlerdir (B2Press, 2020).

COVID-19 pandemisinin Türkiye mobil oyun pazarına olan etkisini, oyuncu davranışlarını inceleyerek ortaya koymayı amaçlayan bu çalışmada; "Battle Royale" türünden dört oyuna ait Türkçe kullanıcı yorumları Google Play Scraper yardımıyla toplanmış, kullanıcıların pandemi öncesindeki ve sonrasındaki duyguları, duygu analizi (*sentiment analysis*) ile incelenmiş, uyum analizi (*correspondence analysis*) ve konu modellemesi (*topic modeling*) kullanılarak ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Oyun meraklısı denilebilecek tüketicilerin ilgisini daha fazla çekmekte olan Battle Royale türündeki oyunların oluşturduğu yüksek rekabet ortamının, oyuncuların oyun değerlendirmeleri ve yorumlarında duygularını daha şiddetli ortaya koymasına yol açabileceği düşünüldüğünden, pandemi gibi bir dönüşüm şokunun etkisinin bu oyun türü kapsamında araştırılmasına karar verilmiştir. Bu çalışma kapsamında önerilen duygu analizi, konu modelleme ve uyum analizini içeren bir analiz çerçevesidir ve her alanda çevrim içi müşteri yorumlarının analizi yoluyla müşteri şikayetleri, tercihleri ve beklentilerinin incelenmesi amacıyla kullanılabilir.

## 2. Literatür Taraması

Çalışmanın bu bölümünde, yapılan uygulamanın kapsamını destekleyecek şekilde ilgili literatürdeki çalışmalara yer verilmiştir. Sırasıyla, müşteri yorumlarının yöneliminin duygu analizi ile incelendiği, yönelimin yanı sıra duygu durumlarının irdelendiği çalışmalara değinilmiş; Türkçe metinlerde karşılaşılan zorlukların üstesinden hangi yöntemlerle gelindiği Türkçe dilinde yapılan çalışmalar üzerinden gösterilmiş; seçilen uygulama alanı olan mobil oyunlara yönelik duygu analizi ve konu modelleme çalışmalarına yer verilmiştir.

### 2.1. Duygu Analizi

Müşteri yorumlarına çeşitli çevrim içi ortamlardan ulaşmak mümkündür. Bu ortamlarda paylaşılan yorumlar, ilgili ürünü satın almayı düşünen bireyler tarafından çoğunlukla bir bilgi kaynağı olarak tercih edilmektedir. Dahası, satın alınmak istenen ürünle ilgili başka tüketicilerin deneyimlerini içeren faydalı yorumlar, bireylerin karar süreçlerinde son derece yardımcı olabilmektedir. Bu yüzden çevrim içi müşteri yorumları, etkili pazarlama stratejilerinin tasarlanması için son yıllarda çok kıymetli bir kaynak haline gelmiştir. Bu amaçla başvurulan metin madenciliği teknikleri, içinde bulunduğumuz “büyük veri çağı”ndaki etki alanını gittikçe genişletmektedir.

Kullanıcı odaklı ürün tasarlamak (Han ve Moghaddam, 2021), işletmelerin mali performansını belirlemek (Myšková ve Hájek, 2020), tüketicilerin sipariş verirken mevcut seçenekler arasından seçim yapmasını sağlayan, otomobil ve bilgisayar gibi yapılandırılabilir ürünlerin kısa vadeli taleplerini tahmin etmek (Işıklı, 2021), suçlar arasında makul ilişkilendirmeler çıkarmak ve suç kalıplarını belirlemek (Qazi ve Wong, 2019) ve benzeri amaçlar için çok farklı alanlarda kullanılmış olan metin madenciliği teknikleri arasından son zamanlarda öne çıkan, doğal dil işleme araçları ve derin öğrenme algoritmalarından yararlanan duygu analizi olmuştur. Bir metnin olumlu, tarafsız veya olumsuz gibi bir duygu sınıfına atanarak kategorize edilmesini amaçlayan duygu analizinden, başta film ve otel yorumları, sosyal medya paylaşımları ve çevrim içi ortamlarda yapılan ürün/hizmet değerlendirmeleri ve yorumları olmak üzere, turizmden sağlığa, eğitimden bankacılığa kadar pek çok alandaki pazarlama zekâsı uygulamalarında yararlanılmaktadır. Özellikle çevrim içi ortamlarda müşteri davranışlarına dair daha derin bir anlayış geliştirebilmek için sıkça kullanılmakta olan duygu analizi, müşterilerin sorun yaşadıkları alanları bulmak, şikâyetlerini ve dar boğazları belirlemek, işletmelerin rakiplerinden farklılaşabilmelerini sağlamak ve müşterilerin memnuniyetini artırarak sadakatlerini geliştirmek için önemli bir araç haline gelmiştir.

Godnov ve Redek (2016), Hırvatistan'daki otellere yönelik ziyaretçi yorumlarını özetlemek için duygu analizi, anahtar sözcük analizi (Örneğin, sözcükler arasındaki korelasyon) ve olasılıksal konu modelleme gibi metin madenciliği yöntemlerinden nasıl faydalanılabileceğini açıklayarak seyahate çıkanlar ve turizm yöneticileri için bazı çıkarımları vurgulamıştır. Metin verisinin toplanması ve analizini içeren ve karar verme sürecini iyileştiren otomatikleştirilmiş bir süreç sunmayı amaçlayan bir çalışma, konaklama endüstrisindeki yöneticilerin konuk yorumlarını analiz etmesine ve SERVQUAL'e dayalı olarak rakipleriyle kendilerini karşılaştırmalarına olanak tanımak için üç metin madenciliği tekniğini (metin sınıflandırması, duygu analizi ve konu modellemesi) özgün bir şekilde birleştirmiştir (Marcolin, Becker, Wild, Behr ve Schiavi, 2021). Müşterilerin ve girişimcilerin daha iyi kararlar almasına yardımcı olan öneri sistemleri sunmak için özellikle duygu analizinin nasıl kullanılabileceğini tartışan yazarlar, karar verme süreçlerini müşteriler için olumlu deneyimler yaratma gerekliliği bağlamında iyileştirmek için yeni bir bakış açısı sunmuştur.

Çevrim içi ürün incelemelerini verimli ve etkili bir şekilde analiz etmek ve bir ürünün güçlü ve zayıf yönlerini ürün özelliklerine göre belirlemek için bir denetimli öğrenme yaklaşımı önererek, ürün yorumlarını oluşturan cümleler ile sözcükler arasında özellik katmanı adı verilen gizli bir katmanın tanımlandığı yeni bir “Özelliğe Dayalı Cümle Modeli” kullanan yaklaşım sayesinde, yeterli sayıda etiketlenmiş gözlemle eğitilmiş olan bir model, varsa, her cümle için en ilintili ürün özelliğini belirleyebilmektedir (Xu, Zhang ve DeGroof, 2018). Belirlenen ürün özellikleri ile her cümle için duygu analizi yapılarak ürün yorumu için ağırlıklı özellik tercih vektörleri elde edilmiş ve ilgili tüm yorumların sonuçları bir inceleme özeti haline getirilmiştir. Önerilen yaklaşımın mevcut yaklaşımlardan daha etkili çalıştığı ve tüketicilere en çok arzu edilen ürün özelliklerine sahip çevrim içi ürünleri bulmaları için çok daha kolay bir yol sağladığı iki vaka çalışması üzerinden gösterilmiştir. Han ve Moghaddam (2021), tasarım ekiplerinin kullanıcı ihtiyaçlarını büyük ölçekte belirleme ve bunları yeni tasarım kavramlarına dönüştürmedeki performansını artıran akıllı bir sistem olarak hizmet edebilmesi için çevrim içi müşteri yorumlarından kullanıcıların duygu ifadelerini çıkarmayı sağlayan yarı denetimli, kural tabanlı yeni algoritmalar sunmuştur.

Duygu analizinde olumlu, tarafsız, olumsuz şeklinde üç temel yönelimin ortaya koyulmasının yanı sıra öfke, korku, mutsuzluk, şaşkınlık, bıkkınlık, keyif, beklenti, güven gibi duygu durumlarına göre yapılan sınıflandırmalar da yaygındır. Temel olarak, hava yolu yolcularının COVID-19 döneminde tavsiye niyetlerini belirleyen gizli faktörleri belirlemeyi ve yolcu yorumlarında ifade edilen duyguların bir hava yolunu tavsiye etme niyetini nasıl



etkilediğini araştırmayı amaçlayan bir çalışmada (Wang, Zheng, Tang ve Luo, 2023), çevrim içi yorumlar kullanılarak neşe, güven, öfke ve iğrenme gibi sekiz temel duygudan dördünün yolcuların tavsiye etme niyetini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Duygu analizinin çok yaygın kullanıldığı uygulama alanlarından biri olan otel ve seyahat yorumlarına odaklanan bir çalışmada ise, yorumlardan çıkarılan sekiz farklı duygu durumunun, kullanıcıların genel beğenisini ifade eden ve kendi yorumlarına verdikleri yıldız derecesiyle korelasyonu incelenmiş ve duygu durumunun verilen yıldız derecesini etkilediği hipotezi desteklenmiştir (Pashchenko, Rahman, Hossain, Uddin ve Islam, 2022). Finansal hizmet sağlayıcılara yönelik kullanıcı yorumlarının sekiz duygu durumuna göre sınıflandırıldığı başka bir çalışmada ise, başka kullanıcıların yapılan yorumlara verdiği cevaplardaki duygudaşlık davranışı üzerinde bu duygu durumlarının nasıl bir etkisi olduğu incelenmiştir (Hossain ve Rahman, 2022).

## 2.2. Türkçe Metin Madenciliği

Metin verisiyle çalışmak oldukça zor olsa da son yıllarda geliştirilen derin öğrenme algoritmaları ve aktarımlı öğrenme yaklaşımı, bu zorlukla baş etmekte yararlı olmaktadır. Yine de sondan eklemeli bir dil olan Türkçede metin madenciliği uygulaması yapmak son derece zorlu bir iş olmaya devam etmektedir. Türkçe metinler üzerine yapılan duygu analizi çalışmalarında, geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerinin tercih edildiği çalışmaların yanı sıra (Altinel, 2021) derin öğrenme (Tuzcu, 2020; Demirci, Keskin ve Doğan, 2019; Ciftci ve Apaydin, 2018; Ahmetoğlu ve Daş, 2020; Onan, 2020) ve dönüştürücü mimarisini (Siğirci ve diğ., 2020; Acikalın, Bardak ve Kutlu, 2020; Masarifoglu ve diğ., 2021) kullanan yaklaşımların da son zamanlarda kullanılmaya başladığı görülmektedir.

Geleneksel yöntemlerin kullanıldığı bir çalışmada, beş farklı veri seti üzerinden KNN, Naive Bayes, Rastgele Ormanlar ve Destek Vektör Makineleri (DVM) yöntemlerinin sınıflandırma performansları karşılaştırılmış; tüm veri setlerinde DVM'nin en iyi sonuçları verdiği, KNN'nin ise en düşük sınıflandırma doğruluğuna sahip olduğu tespit edilmiştir (Altinel, 2021). Çalışmada kullanılan veri setleri ve yapılan duygu sınıflandırmaları şu şekilde özetlenebilir: i) turizm sektörüne yönelik tivitler: olumlu, olumsuz, ii) satın alınan ürünlere ait iki farklı veri setindeki kullanıcı yorumları: olumlu, olumsuz, tarafsız, iii) izlenen filmlere yönelik yorumlar: olumlu, tarafsız, olumsuz, iv) çeşitli blog yazıları: neşeli, sinirli, üzgün, karışık.

Geleneksel yöntemlerle derin öğrenme algoritmalarının sınıflandırma performansının karşılaştırıldığı başka bir çalışmada ise, 47 kitap için çevrim içi kitap satışı yapan bir sitede yapılmış olan kullanıcı yorumları DVM, LR ve Naive Bayes'in yanı sıra Çok Katmanlı Algılayıcı (*Multi-Layer Perceptron-MLP*) sayesinde olumlu ve olumsuz olmak üzere sınıflandırılmış; MLP'nin sınıflandırmada en başarılı olduğu görülmüştür (Tuzcu, 2020).

Tekrarlayan Sinir Ağları (*Recurrent Neural Networks-RNN*), Türkçe metinlerin duygu analizi için tercih edilen derin öğrenme algoritmalarından biridir. Üç farklı vektör modelinin kullanıldığı bir çalışmada, otel yorumları RNN ile incelenmiştir: birinci modelde veri setindeki her sözcüğün vektörel karşılığı oluşturularak girdi olarak kullanılmış, ikinci modelin giriş katmanında rastgele vektörler kullanılmış, üçüncü modelde ise otellerle alakasız olan Wikipedia makalelerinden oluşturulmuş genel vektörler kullanılmıştır (Ahmetoğlu ve Daş, 2020). Genel vektörler kullanıldığında daha yüksek sınıflandırma başarısı elde edilirken verinin kendisinden üretilmiş olan konuya özel vektörlerin kullanıldığı modelde en düşük kayıp değerine ulaşılmıştır. Evrimsel Sinir Ağları'nın (*Convolutional Neural Networks-CNN*) Türkçe tivitlerdeki duyguları olumlu ve olumsuz olarak sınıflandırma performansı, geleneksel öğrenme algoritmalarından DVM, LR, KNN ve Naive Bayes ve derin öğrenme algoritmalarından RNN, Uzun Kısa Süreli Bellek (*Long Short Term Memory-LSTM*) ve Geçitli Tekrarlayan Birim Mimarisi (*Gated Recurrent Unit-GRU*) ile karşılaştırıldığında, CNN'nin diğer yöntemlerin hepsine üstünlük sağladığı görülmüştür (Onan, 2020).

Dönüştürücü mimarisini kullanan modellerin doğal dil işleme alanında daha başarılı sonuçlar elde etmesi, duygu analizi için de bu yaklaşımın kullanılmasını beraberinde getirmiştir (Masarifoglu ve diğ., 2021). Google Play'deki uygulamalara yapılan iki milyonun üzerindeki Türkçe yorumun olumlu ve olumsuz şeklinde sınıflandırılmasında BERT modeli kullanılmış ve daha küçük eğitim veri kümelerinde bile BERT'in yüksek başarı sağladığı tespit edilmiştir (Siğirci ve diğ., 2020). Türkçe dilindeki otel ve film yorumlarının önce Çok Dilli BERT ile olumlu ve olumsuz şeklinde sınıflandırılması, daha sonra Türkçe yorumların bir çevirici ile özdevinimli olarak İngilizce diline çevrilerek BERT ile tekrar sınıflandırılması sonucunda, Çok Dilli BERT'in film veri kümesinde başarılı olduğu; fakat çok sayıda veri olduğunda, yorumları özdevinimli çeviri programları yardımıyla İngilizceye çevirip klasik BERT'i kullanmanın daha iyi sonuç verdiği bulunmuştur (Acikalın ve diğ., 2020). Hem Google Play yorumlarında hem de otel ve film veri kümelerinde, kullanıcıların vermiş olduğu puanlar etiketleme amacıyla kullanılmıştır (Siğirci ve diğ., 2020; Acikalın ve diğ., 2020). Bankacılık ürün ve hizmetlerinin değerlendirildiği Net Tavsiye Skoru (*Net Promoter Score-NPS*) anketlerindeki yorumlar için oluşturan eğitim veri kümesi, ürün ve hizmetleri tavsiye edenler, etmeyenler ve tarafsızlar şeklinde elle etiketlenerek hem geleneksel yöntemlerle hem

de BERT ile analiz edilmiş; tüm yöntemlerin yeterli eğitim verisi olduğunda başarılı olduğu, BERT'in performansının kısıtlı eğitim verisinden daha az etkilendiği gösterilmiştir (Masarifoglu ve diğ., 2021).

### 2.3. Mobil Oyunlarda Duygu Analizi

Mobil oyunlarla ilgili literatür incelendiğinde, oyunların kullanılabilirliği ve sundukları hizmetin iyileştirilmesi üzerine yapılmış olan çalışmaların ağırlıkta olduğu görülmüştür. Hizmet kalitesinin iyileştirilmesi amacıyla duygu analizi ile istatistiksel süreç kontrol yaklaşımını birleştiren bir çalışmada, AppStore üzerinden indirilen “Angry Birds 2” oyununa ait yorumların duygu analizi ile müşteri memnuniyeti ve memnuniyetsizliği tespit edilmiş; istatistiksel süreç kontrolü sayesinde ise müşteri şikâyetlerinin erken tespiti, hizmet hatalarının önlenmesi ve şikâyetlerin çözülmesi yoluyla hizmet kalitesinin sürdürülebilirliği hedeflenmiştir (Kim ve Lim, 2021). Dört farklı oyuna yapılan yorumların analiziyle elde edilen olumlu ve olumsuz duygu yönelimlerinin müşteri kaybı üzerindeki etkisi derin öğrenme algoritmalarıyla incelenmiştir (Kilimci, Yörük ve Akyokus, 2020). Hizmet kalitesiyle ilişkilendirilebilecek başka bir çalışmada, mobil oyunlardan duyulan memnuniyetin boyutları kümeleme analizi ile elde edilmiş ve bu boyutlara dair duygu yönelimleri tespit edilmiştir (Ren ve Li, 2020).

Oyun geliştiricilerin strateji ya da tercihlerine kullanıcıların verdiği tepkiler de duygu analizi ile incelenebilir. NetEase şirketinin bir oyununu “pay-to-win” güncellemesinden sonra ortaya çıkan yüksek orandaki memnuniyetsizliğe karşı şirketin yayınladığı üç özür mesajının altında yatan kriz iletişimi stratejilerine kullanıcıların tepkisi Anlam Ağ Analizi (*Semantic Network Analysis*) ve duygu analizi ile incelenmiştir (Che ve diğ., 2022).

Hangi oyunların daha çok tercih edildiğini inceleyen bir çalışmada sırasıyla i) her birinde beşer oyun olacak şekilde strateji, spor, çok oyunculu savaş, yarış oyunları gibi 11 farklı kategori oluşturulmuş, ii) 500'ün üzerinde katılımcı tarafından her kategoriden en çok tercih edilen birer oyun belirlenmiş, iii) belirlenen oyunlara ilişkin yorumlar Apple ve Huawei Store'dan çekilmiş, iv) bu yorumlardan 200 özellik (*features*) çıkarılmış, v) bu özellikler Kümeleme Analizi ile beş kümede gruplandırılmış, vi) BERT modeli ile beş kümedeki özelliklere ait toplam duygu yönelimleri hesaplanmış, vii) bu yönelimler sezgisel bulanık sayılara dönüştürülmüş (*intuitionistic fuzzy numbers*) ve seçilen oyunlar VIKOR yöntemi yardımıyla belirlenen özelliklere göre sıralanmıştır (Qu ve diğ., 2023).

Duygu analizi ve konu modellemenin birlikte kullanıldığı çalışmalarda eğilim, oyunlara yönelik özelliklerin konu modelleme ile elde edilmesi ve bu konulara yönelik duygu yönelimlerinin incelenmesi şeklindedir. Video oyunları için müşteri memnuniyetini etkileyen boyutların konu modellemesi ile kullanıcı yorumlarından çıkarıldığı ve bu boyutlara yönelik duygu skorlarının tespit edilerek her iki bilginin bağımsız değişkenler şeklinde müşteri değerlendirme puanı bağımlı değişkenine olan katkısını incelemek amacıyla bir regresyon modeline dâhil edildiği çalışma buna örnek gösterilebilir (Wang ve Goh, 2020). Bu iki yöntem, e-spor oyunlarının (sanal ortamda, oyunlar üzerinden yapılan karşılaşmalar) gelecek yönelimlerini ortaya koyabilmek amacıyla kullanıcıların hangi konulara karşı nasıl yönelim gösterdiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır (Yu ve diğ., 2023). Oyunların oynanabilirliği de kullanılabilirlik, oynayıp ve fonksiyonellik açısından duygu analizi ve konu modellemesi ile incelenmiştir (Li, Zhang ve Stefanidis, 2021).

## 3. Yöntem

### 3.1. Metin Madenciliği Süreçlerine Genel Bakış

Klasik bir metin madenciliği çalışmasının, genel olarak, üç aşaması bulunmaktadır: metin ön işleme, metin inceleme ve metin son işleme. Birinci aşamada, bir metin veri tabanından çıkarılan veriler sınıflandırılır ve bir tür öznitelik çıkarmayla işlenir. Ardından metne normalleştirme işlemi uygulanır ve çeşitli metin madenciliği araçlarına uygunluklarını sağlamak için belgeler ara bir forma dönüştürülür. Veri işaretleme süreci hem manuel hem de özdevimimli olarak yürütülebilir. İkinci adımda, çıkarılan tüm özniteliklerle sınıflandırma, kümeleme ve ilişkilendirme kuralları tanımlanır ve bir makine öğrenme algoritması uygulanarak tahminleme yapılır. Terim sıklıklarının hesaplanması ve görselleştirme işlemleri de bu aşamada yapılır. Sonunda, yapılandırılmış veri elde edilmiş olur; verilerde gerekli değişiklikler ve eklemeler, bilginin değerlendirilmesi ve seçimi, bilginin analizi ve görselleştirilmesi gibi metin madenciliği işlevleri uygulanır.

Doğal Dil İşleme (DDİ), makinelerin insan dillerini anlamak ve oluşturabilmesini sağlamak amacıyla diller üzerine hesaplamalı çözümler üretmeye odaklanmıştır. DDİ sayesinde arama motorları, çeviri sistemleri, iletişim asistanları, duygu analizi, fikir analizi gibi uygulamalar daha iyi sonuç verecek şekilde tasarlanabilmektedir (Acheampong, Nunoo-Mensah ve Chen, 2021). Bununla birlikte, sırasal özelliğe sahip olması nedeniyle metin verilerinin çözülmesi oldukça zordur. Cümle içindeki sözcüklerin ve metin içindeki cümlelerin anlam olarak sıralı ilişkileri vardır. RNN sıralı verileri modelleme kapasitesine sahip olsa da uzun erimli sırasal bağımlılıkları

dikkate almamaktadır. Daha sonra geliştirilen LSTM, bu kısıtlamaları hafifleterek uzun erimli bağımlılık problemlerine çözüm getirmeyi hedeflemiştir. Dikkat Ağları (*Attention Network*), hem RNN hem de LSTM yaklaşımlarının sıkıntılarını gidermek amacıyla önerilmiştir. Dizi modellemenin ayrılmaz bir parçası olan dikkat mekanizması, dizilerdeki mesafelerine bakmaksızın bağımlılıkların modellenmesine izin verir. Dizi çıktısına ilerlediğinde, dizinin LSTM'den daha fazla dikkat çekmesi gereken kısmını vurgulamak için bir dikkat aralığı oluşturur. Böylece dizinin her bir ögesi için dikkat puanları üreterek bir girdi dizisinden bir alt küme seçer. Vaswani ve diğ. (2017), dikkat modelini kodlayıcı (*encoder*) ve kod çözücü (*decoder*) ile birleştirerek Dönüştürücü (*Transformer*) modelini önermiştir. İlişkisel içeriği böylece daha iyi ortaya koymuş, uzun erimli sırasal bağımlılık problemlerini çözmeye çalışmıştır. Kodlayıcı-kod çözücü mimarilerinde en yaygın olarak kullanılan RNN'yi çok başlı öz-dikkat ile değiştiren Dönüştürücü, tamamen dikkate dayalı ilk dizi iletim modelidir (de Santana Correia ve Colombini, 2022). Öz-dikkat mekanizması, odaktaki gömmeyi farklı konularla ilişkilendiren, böylece gömmenin zengin bir temsiliyi öğrenen bir dikkat mekanizmasıdır. RNN'nin sınırlarını aşan bir derin öğrenme modeli olan Dönüştürücü, uzun vadeli bağımlılıkları ve etkileşimleri yakalayarak ağır tüm diziden bağlamsal bilgileri elde etmesini sağlar. Başka bir deyişle, dizinin her konumunun, dizideki diğer tüm konumlara paralel olarak katılmasını sağlayarak LSTM gibi önceki dizi modellerinin dizi bağımlılığı problemini çözer (Raza ve Ding, 2022). Özet olarak, Vaswani ve diğ. (2017), ilk görevde elde edilmiş ağırlıkları kullanarak bir görevden elde edilen bilgiyi ilişkili başka bir göreve uygulayıp ön eğitim sürecinde eğitim süresini kısaltmanın yanında daha doğru sonuçlar veren modeller elde etmişlerdir. Çeviri görevleri için Dönüştürücü'nün, RNN veya CNN'ye dayalı mimarilerden önemli ölçüde daha hızlı eğitilebildiğini de göstermişlerdir (Vaswani ve diğ., 2017).

BERT (Dönüştürücülerden Çift Yönlü Kodlayıcı Temsilleri – *Bidirectional Encoder Representations from Transformers*), Google tarafından geliştirilen çift yönlü derin dönüştürücü yapısıdır (Deepa ve Tamilarasi, 2021; Devlin ve Chang, 2018). Bu model, bir metindeki dili anlamayı amaçlayan genel amaçlı bir modeli öğrenmek için önceden eğitilmiş dil temsillerine başvurur. Diğer bir ifadeyle, büyük sayıda etiketsiz veri ile ön eğitime tâbi tutarak metinsel gömme elde eder. BERT modellerinde iki adım uygulanır: Ön eğitim (*pre-training*) ve ince ayar (*fine-tuning*). Girdi metinlerini çift yönlü okuyan (soldan sağa ve sağdan sola) BERT'in ön eğitiminde, iki gözetimsiz tahmin görevi yerine getirilir: (a) maskelenmiş dil modelinin (*Masked Language Model*) eğitimindeki amaç, gizlenen bazı sözcüklerin model tarafından tahmin edilmesidir; (b) ardışık cümle tahmininin (*Next Sentence Prediction*) eğitim görevinde ise, bir cümleden sonra gelen ikinci cümle tahmin edilmeye çalışılarak iki cümle arasındaki sırasal ilişki bulunmaya çalışılır. Dönüştürücü kodlayıcısı (*transformer encoding*) tüm sözcük dizisini okur ve sözcüğü, cümlenin anlamı içinde, çevresindeki sözcüklerle birlikte değerlendirir. BERT ince ayar kısmında ise, model, çıktı katmanının önüne bir katman eklenerek kullanıcının sınıflandırma görevini yerine getirmesi için ilgilenilen alandan alınan yeni verilerle eğitilir. Böylece BERT modelinin ilk katmanlarında, ön eğitim sonunda, hâlihazırda kodlanmış olan dille ilgili bilgiler sınıflandırma amacıyla kullanılmış olur.

Konu modelleme, bir doküman kümesinden, dokümanların ilgili oldukları konuları belirleyen bir makine öğrenmesi tekniğidir (Mehta, Kumar ve Ramkumar, 2021). Dokümanların çoğunluğunu kapsayan sözcük kümeleri oluşturulur ve her küme bir konuyu gösterir. Genel anlamda konular, ortak bir entelektüel bilgi alanına sahip belgelerden oluşur; büyüklükleri zamanla değişebilir. Konu modelleme binlerce dokümandan oluşan bir külliyatı (*corpus*) en çok öne çıkan konuları yakalayarak bir özet haline getirir (Churchill ve Singh, 2022). Konu modelleme, içerik analizi için otomatikleştirilmiş bir yöntem olarak da görülebilir (Schmiedel, Müller ve Vom Brocke, 2019).

### 3.2. Metodolojik Çerçeve

Bu çalışmada önerilen ve görsel anlatımı Şekil 1'de verilmiş olan metodoloji aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. **Kapsamın Belirlenmesi:** Analiz edilecek oyun türünün ve oyunların belirlenmesi.
2. **Veri Analizi:** Google Play Scrapper yardımıyla metin verisinin çekilmesi, metnin temizlenmesi (noktalama işaretlerinin, sayısal karakterlerin, gereksiz sözcüklerin ve bağlaçların kaldırılması; sekme boşluklarının veya fazladan boşlukların çıkarılması; özel isimlerin çıkarılması; sözcüklerin küçük harfe dönüştürülmesi), verinin işlenmesi (sözcüklerin köklerinin bulunması ve köklerinin tek boyutlu dizi haline getirilmesi, dizinin sözlük yapısına uygulanması, TF-IDF yöntemi ile külliyatın oluşturulması), yorumların olumlu, tarafsız ve olumsuz olarak işaretlenmesi, eğitim ve test veri kümelerinin oluşturulması.
3. **Modelleme:** BERT modelinin işaretlenmiş eğitim kümesi ile eğitilmesi ve Türkçe dil seçeneği ile duygu analizi yapılması, BERTopic modelinin Türkçe dil seçeneği ile oluşturulması, model sonuçlarının görselleştirilmesi (dokümandaki sözcük sayılarının genel dağılımı ve konu tabanlı dağılımları, konu tabanlı olarak en sık kullanılan sözcüklerin gösterimi, sözcük sayılarının konu tabanlı dağılımı, konulararası mesafe haritası), uyum analizi ile oyunların karşılaştırılması.

Türkçe dilinde doğal dil işleme (DDİ) görevleri için kullanılan farklı modeller bulunmaktadır: Türkçe BERT, Türkçe GPT, Türkçe XLNet ve Türkçe ELECTRA. Bu çalışmada, Türkçedeki çeşitli DDİ görevleri için yaygın olarak kullanılması ve kapsamlı olarak çalışılması gibi avantajlara ve mevcut veri hatlarına entegrasyon için önceden eğitilmiş modellere sahip olan Türkçe BERT tercih edilmiştir. Bununla birlikte, belirli DDİ görevine bağlı olarak, GPT gibi modeller veya belirli görevler için eğitilmiş modeller daha uygun olabilir. Ayrıca ALBERT veya ELECTRA gibi alternatif modeller, daha düşük hesaplama karmaşıklığı nedeniyle hesaplama kaynaklarının sınırlı olduğu durumlarda tercih edilebilir.

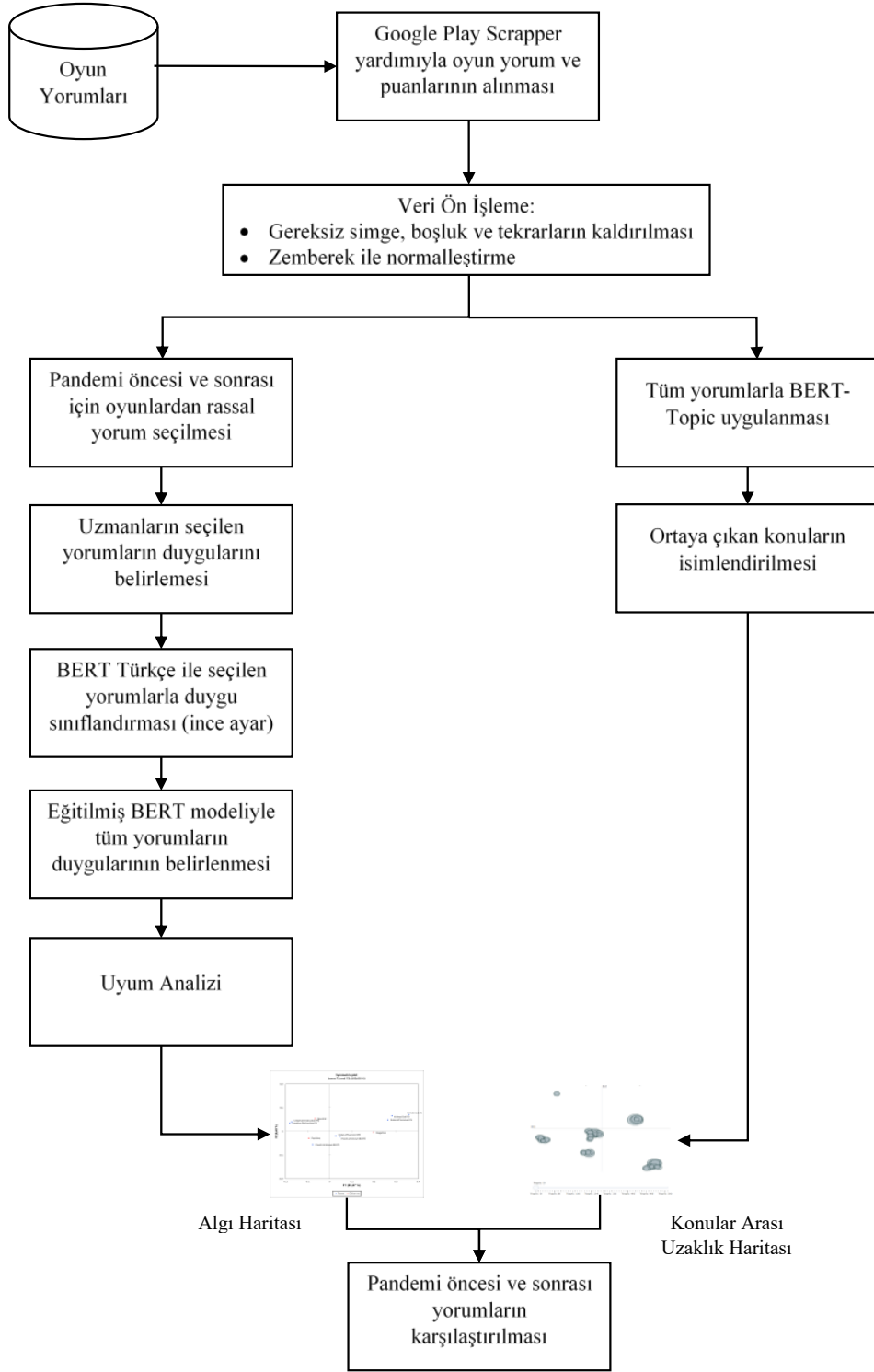
#### 4. Bulgular

Dünya genelindeki gelirlerini yıldan yıla düzenli olarak artırmakta olan oyun piyasasının (181 milyar ABD doları), 2021 yılı sonundaki küresel toplam gelirler göz önüne alındığında, kaydedilmiş müzik (25,9 milyar ABD doları) endüstrisini geçtiği, film (328 milyar ABD doları) endüstrisine ise ciddi bir rakip olmaya devam ettiği görülmektedir (Smirke, 2022; “Motion Picture Association”, 2022). Bu gelir artışına 93 milyar ABD dolarıyla en büyük katkıyı akıllı telefonlarda oynanan oyunlar sağlamaktadır (Wijman, 2021). Daha kullanılabilir yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle Türkiye’de de büyümesi hızlanmış olan mobil oyun piyasası, COVID-19 pandemisinin yarattığı kriz ortamında, özellikle insanların evlerini terk edemediği dönemde, var olan oyuncuların oyunlar için daha fazla zaman harcamaya başlaması ve piyasaya yeni oyuncuların katılmasıyla gelirlerini belirgin biçimde artırmıştır. Böyle bir pazarın pandemi gibi bir dönüşüm şokundan nasıl etkilendiğini araştırmak son derece önemlidir. Bu amaçla, önceki bölümde verilen metodoloji, 2021 yılında 600 milyon ABD dolarından fazla gelir getirdiği bildirilen Türkiye mobil oyun pazarında (“The Gaming Market in Turkey”, 2022) uygulanmıştır. Oyun türü olarak, Sensor Tower’ın sınıflandırmasına göre (“Sensor Tower”, 2022) “Mid-Core” segmentinin “Shooter” alt başlığı altında yer alan “Battle Royale” seçilmiş, bu türdeki ücretsiz dört oyunun incelenmesi uygun bulunmuştur. Uygulamanın gerçekleştirildiği ortamın parametreleri şu şekilde özetlenebilir: Intel Core i7-4500U 1,8 GHz CPU; 8 GB RAM; 64 Bit İşletim Sistemi.

Çalışmaya konu olan oyunlar hakkındaki yorumlar Google Play Scraper yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen yorumlardaki gereksiz simge, boşluk ve tekrarlar temizlenmiştir. Zemberek yardımıyla normalleştirme uygulanmıştır. Bunu takiben, pandeminin etkisinin anlaşılabilmesi için veri seti ikiye ayrılmıştır: 31 Mart 2020 öncesindeki yorumların pandemi öncesine, bu tarihten sonrasındakilerin pandemi sonrasına ait olduğu varsayılmıştır. Çalışmada incelenen yorumların pandemi öncesi ve sonrasına göre oyun bazında dağılımı Tablo 1’de verilmiştir:

**Tablo 1.** Konu ve küme sayılarının değişimi

Oyunlar	Pandemi Öncesi	Pandemi Sonrası	Toplam
Creative Destruction	9861	2431	12292
Knives Out	2516	678	3194
Pixels Unknown Battleground	6797	2548	9345
Rules of Survival	62875	1374	64249



Şekil 1. Metodolojik çerçeve

Yorumlardaki olumlu, tarafsız ve olumsuz duygu içeriğiyle yorumcunun oyuna verdiği puan arasındaki ilişkinin zayıflığı nedeniyle, yorumların duygulara göre gruplanması amacıyla eğitim verisi hazırlanmaya karar verilmiştir. Temizlenmiş verilerin 2000 adetlik bir alt kümesi yorumu yapanların oyuna verdikleri puanlarla birlikte incelenmek üzere dosyaya yazılmıştır. Oyunlar hakkındaki yorumların yukarıda belirtilen üç duygu sınıfından hangisine girdiği uzmanlar tarafından belirlenmiştir.

Sınıflandırma işlemi için BERT modelinin kullanılmasına karar verilmiştir. BERT’te ön eğitim ve ince ayarlama olmak üzere iki adım bulunmaktadır. İnce ayarlama aşamasında model, ön eğitim parametreleri ile çalışmaya

başlatılır ve tüm parametreleri etiketli verilerden oluşan girdiler kullanılarak düzeltilir. Ön eğitim parametreleri “bert-base-turkish-uncased” modelinden alınmıştır. Yukarıda açıklanan 2000 adet veri kullanılarak ele alınan konuya uygun olarak ince ayarlama yapılmıştır. İnce ayarlama adımında, ön eğitim adımında kullanılan parametreler kullanılmıştır. Bir yorumda bulunabilecek sözcük – token – sayısını gösteren yorumların maksimum uzunluğu 512, gradientler güncellenmeden önce eğitime giren yorum sayısını gösteren yığın büyüklüğü (*batch size*) 16 olarak alınmıştır. Kayıp fonksiyonu (*loss function*) olarak Cross Entropy Loss ve optimize edici (*optimizer*) olarak AdamW optimize edicisi kullanılmıştır. Öğrenme oranı 0,00002 ve dönem sayısı (*epoch*) 10 olarak kabul edilmiştir.

#### 4.1. Konu Modelleme ve Kümeleme Analizi

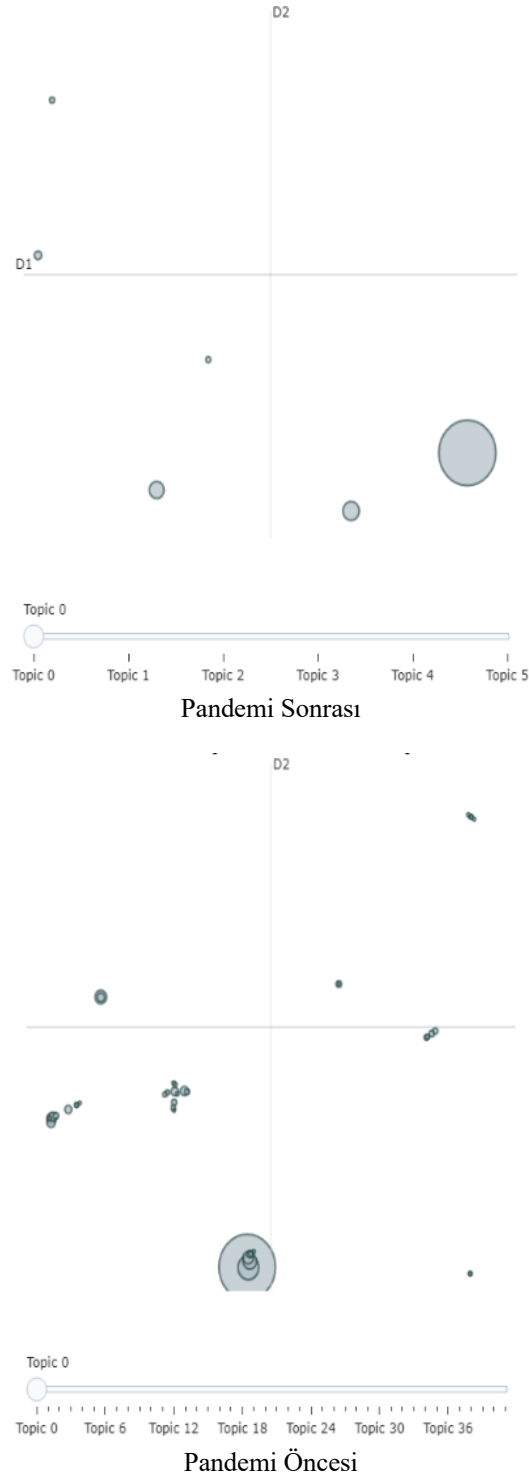
Duygu analizi yapmadan önce, sadece oyuncu yorumları göz önünde bulundurularak, pandeminin etkisini ölçmek için BERTopic algoritması Türkçe dil seçeneği ile çalıştırılarak konu modellemesi yapılmıştır. Stokastik bir yapısı olan bu algoritma sayesinde oluşturulan kümeler her denemede değişebileceğinden, yorum yaparken, sadece hiyerarşik kümeleme sonucunda elde edilen dendrogramların ve konulararası uzaklık haritalarının (*intertopic distance map*) önerdiği yaklaşık küme sayısına bağlı olarak ortaya çıkan en kalabalık kümeler dikkate alınmıştır. Tablo 2’de, pandemi sonrasındaki konu ve küme sayıları ile pandemi öncesindeki karşılaştırılmaktadır.

**Tablo 2.** Konu ve küme sayılarının değişimi

Oyun Adı	Konu ve Küme Sayıları	
	Pandemi Sonrası	Pandemi Öncesi
Creative Destruction	6 konu; 3 küme	42 konu; 8 küme
Knives Out	18 konu; 3 küme	58 konu; 6 küme
Pixels Unknown Battleground	55 konu; 10 küme	23 konu; 4 küme
Rules of Survival	3 konu; 3 küme	70 konu; 9 küme
TOPLAM	82 konu; 19 küme	193 konu; 27 küme

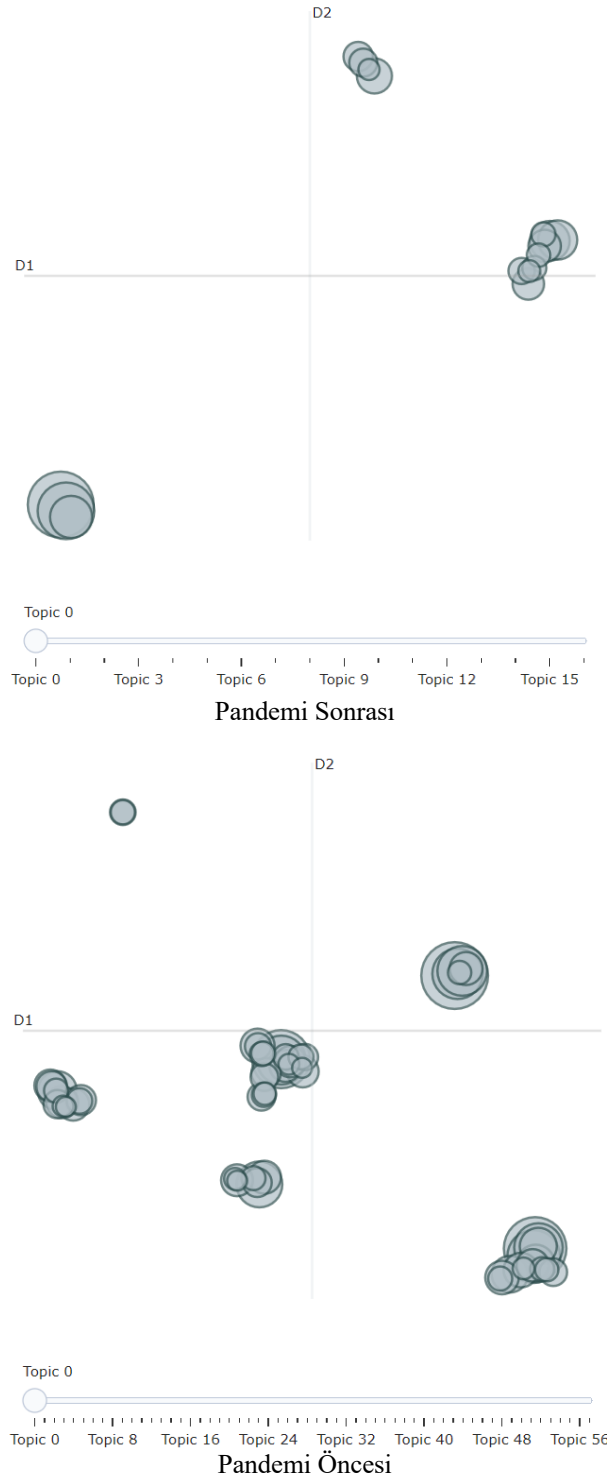
Şekil 2-5’te verilen konular arası uzaklık haritaları, Tablo 1’deki bilginin daha rafine hale getirilmesine yardımcı olmaktadır. Konular arası mesafe haritası, farklı konular arasındaki ilişkileri anlamak için konu modellemesinde kullanılan bir görselleştirme aracıdır. Konuların içindeki kelimelerin dağılımına dayalı olarak konular arasındaki benzerlik veya farklılığın belirlenmesine yardımcı olur. Tipik olarak her noktanın bir konuyu temsil ettiği bir dağılım grafiği olan bu görsel araçtaki noktaların harita üzerindeki konumu, konular arasındaki ilişkiler hakkında fikir verir. Aşağıdaki şekillerde D1 olarak isimlendirilmiş olan x-ekseni, her bir konunun yatay konumunu temsil etmektedir. Bu eksen genellikle “log(lift)” veya “log(kw)” adı verilen ve bir konudaki sözcükler ile tüm külliyat arasındaki ilişkinin gücünü ölçen bir metrikle ilişkilendirilir. Aşağıdaki şekillerde D2 olarak isimlendirilmiş olan y-ekseni ise, her bir konunun dikey konumunu temsil etmektedir. Bu eksen de genellikle “log(lift)” veya “log(kw)” adı verilen ve içerdiği sözcüklere göre konunun alaka düzeyini veya önemini ölçen bir metrikle ilişkilendirilir. Harita üzerindeki noktaların konumları analiz edilerek konular arasındaki ilişkiler hakkında fikir edinilebilir. Harita üzerinde birbirine daha yakın olan konular içerdikleri sözcükler açısından daha benzer, birbirinden daha uzak olan konular ise daha farklıdır.

“Creative Destruction” oyununda, her iki durumda da sadece bir tane büyük küme bulunmaktadır ancak pandemi öncesinde, pandemi sonrasına kıyasla daha fazla sayıda küçük boyutlu küme olduğu göze çarpmaktadır. “Knives Out” oyununda ise, kümeler iki durumda da epey büyük çıkmıştır. “Pixels Unknown BG” dışındaki tüm oyunlar için pandemi sonrasında bulunan konu ve küme sayısı, pandemi öncesine kıyasla daha fazladır. Bu oyunda, pandemi öncesinde sadece bir büyük küme bulunurken pandemi sonrasında kümelerin sayısının arttığı ve boyutlarının birbirine daha yakın olduğu görülmektedir. “Rules of Survival” oyununda, pandemi öncesi için bir büyük, çok sayıda küçük küme bulunmuşken pandemi sonrasında tüm konuların tek bir büyük kümede toplandığı görülmektedir. Pandemi sonrasındaki bu durumdan dolayı ilgili konular arası mesafe haritasında eksenlerin çizdirilmesine gerek kalmamıştır. Pandemi öncesinde, “Knives Out” dışındaki tüm oyunlar için birer büyük küme olduğu, çok sayıda küçük kümenin ise ilgili düzlemlerde dağınık biçimde konumlandığı görülmektedir.



Şekil 2. Creative Destruction ve Knives Out oyunu için konulararası uzaklık haritaları

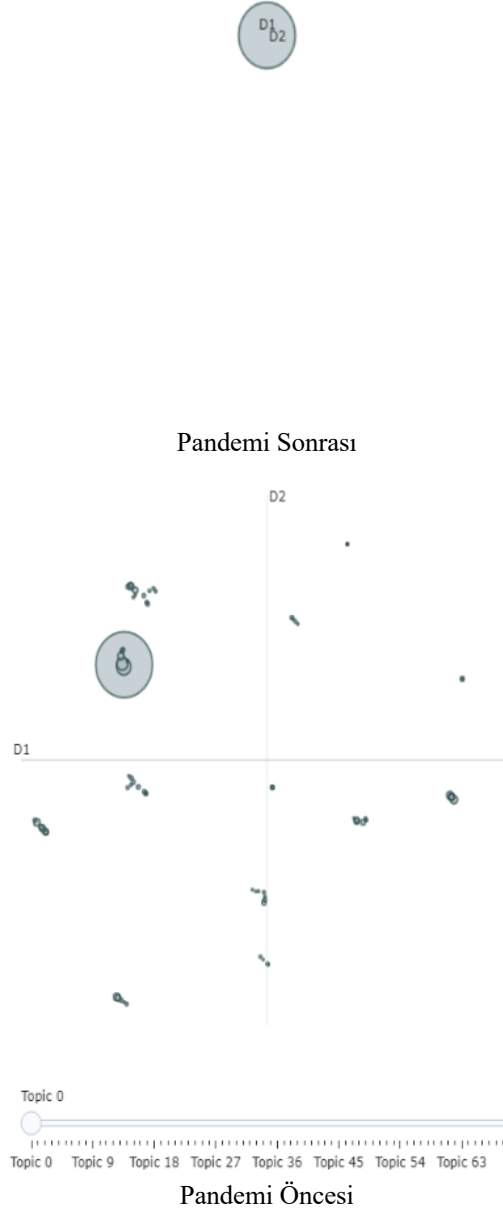




Şekil 3. Knives Out oyunu için konulararası uzaklık haritaları



Şekil 4. Pixels Unknown Battleground oyunu için konulararası uzaklık haritaları



Şekil 5. Rules of Survival oyunu için konulararası uzaklık haritaları

Konu modellemesinin sonucunda, kullanıcı yorumlarının odaklandığı konuların pandemi öncesi ve sonrası değişimi incelenmiştir. İlgili bulgular oyun bazında aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Creative Destruction:** Pandemi öncesi bu oyuna yönelik yorumlar çeşitli konu başlıklarına dağılmış durumdadır. Örneğin, oyun indirilirken hata alma, oyunun kapladığı alan, hız problemleri, grafik sorunları ve dil desteğine ek olarak oyun tasarımına yönelik talepler göze çarpmaktadır; fakat pandemi sonrası yorumların, dil desteği ve platform başlıkları altında toplanabilecek iki sorun grubuna odaklandığı tespit edilmiştir.

- **Knives Out:** Pandemi öncesinde grafik sorunları, güncelleme (dil desteği, haritalar ve sunucu ile ilgili) ve yavaşlık gibi gruplara odaklanan yorumlar ağırlıktayken, pandemi sonrasında oyunun kapladığı alan/indirme sorunları ile yavaş açılma (hız) sorunları vurgulanmış durumdadır. Yavaşlık (hız) hem pandemi öncesi hem de pandemi sonrası dönemde kullanıcıların önemli bir problemi olarak göze çarpmaktadır. Türkiye’de sağlanan İnternet hizmetinin altyapı ve hız yetersizliği, bu oyunun açılmaması ya da takılmasında etkili olması muhtemeldir.
- **Pixels Unknown Battleground:** Pandemi öncesi yorumlarda bir odaklanma göze çarpmamaktadır. Tek yorum grubu, oyunun tasarımına yönelik eleştiri ve beklentileri içeren gruptur. Pandemi sonrasında ise oyun tasarımı yorumları geçerliliğini korurken, oyunun kapladığı alan/indirme sorunları ile açılmama, kesinti olma gibi hız ve bağlantı sorunları da kendini göstermiştir.
- **Rules of Survival:** Pandemi öncesinde platform ile ilgili yorumlar, grafik ve güncellemeye yönelik beklentiler, oyun tasarımına yönelik eleştiriler ve yavaş açılma (hız) sorunları vurgulanmıştır; fakat pandemi sonrasında genellikle oyunu puanlamaya ya da değerlendirmeye yönelik yorumlar öne çıksa da yorumların herhangi bir konuya odaklandığını söylemek güçtür.

Tüm oyunlar göz önünde bulundurulduğunda, oyun bazında istisnalar olmak üzere, pandemi öncesinde öne çıkan konuların oyun tasarımı, hız, grafikler ve güncelleme olduğu görülmektedir. Pandemi sonrasında ise oyunun kapladığı alan, hız ve oyunu indirme başlıkları ön plana çıkmaktadır. Oyunun yavaş inmesi, uzun sürede açılması, mobil cihazı zorlaması gibi sorunları içeren hız başlığına hem pandemi öncesinde hem de pandemi sonrasında rastlanmaktadır. Oyunun mekaniği (kuralları, nasıl kontrol edilebildiği vs.), seviyeleri, karakterleri, hikayesi, görselleri gibi genel oyun deneyimine katkı sunan tüm etkileşimli öğeleri içinde barındıran oyun tasarımı başlığının pandemi sonrasında, pandemi öncesine kıyasla pek öne çıkmamış olması da dikkat çekicidir.

## 4.2. Uyum Analizi

Oyunlara yapılan yorumların duygu analizi ile incelenmesi sonucunda, kullanıcıların olumlu, tarafsız ya da olumsuz duygulara yakın olma durumu değerlendirilmiş ve bu duyguların pandemi öncesi ve sonrasına ait frekansları belirlenmiştir. Kullanıcıların seçilen oyunlara ilişkin yorumlarının hangi duygu durumu ile ilişkili olduğu ve pandemi sonrası değiştiği düşünülen oyun oynama davranışı ve sıklığının bu duygu durumlarını değiştirip değiştirmediği uyum analizi ile incelenmiştir. Analizde kullanılan çapraz tablo (*contingency table*), Tablo 3’te verilmektedir. Klasik Uyum Analizi’nde katılımcıların genelde ürünlerin çeşitli özelliklerle ilişkili olup olmadıklarını varlık-yokluk (1-0) şeklinde değerlendirdiği bir veri toplama süreci uygulanmaktadır. Bu çalışma kapsamında oyunların hangi duygu durumuyla ilişkili olduğu kullanıcıların oyunlara ilişkin yorumlarından çıkarılmıştır. Diğer bir ifadeyle, kullanıcılardan oyunlara ilişkin algılarını olumlu, tarafsız ya da olumsuz olacak şekilde doğrudan değerlendirmelerini istemek yerine, oyunlara ilişkin düşünceleri Duygu Analizi ile incelenerek bu bilgiler elde edilmiştir. Bu yaklaşım, ek bir veri toplama süreci gerektirmemesi açısından avantaj sağladığı gibi kullanıcıların oyunun geneline yönelik tek bir değerlendirme yapması yerine kendilerinin yorumlarından açığa çıkan örtülü algılarının analize dahil edilmesi açısından önemlidir.

**Tablo 3.** Uyum analizi girdisi – çapraz tablo

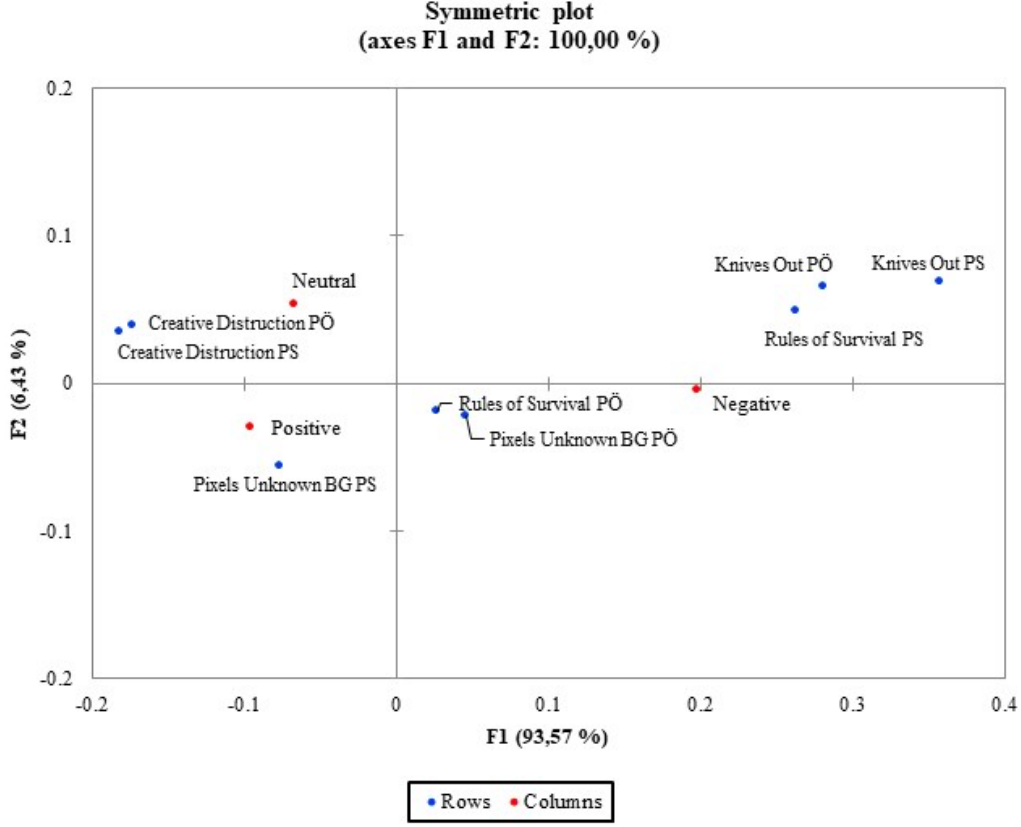
Oyun Adı	Olumlu	Tarafsız	Olumsuz
Creative Destruction PÖ	4437	2870	2020
Knives Out PÖ	765	612	1008
Pixels Unknown Battleground PÖ	2593	1519	1927
Rules of Survival PÖ	10253	6038	7326
Creative Destruction PS	1337	854	593
Knives Out PS	224	188	347
Pixels Unknown Battleground PS	1473	779	810
Rules of Survivor PS	629	476	784

\*PÖ: Pandemi Öncesi, PS: Pandemi Sonrası

Uyum analizi, kategorik değişkenler arasındaki ilişkinin iki boyutlu bir algı haritasında gösterilmesine dayanan çok değişkenli bir istatistiksel analiz tekniğidir (Hoffman ve Franke, 1986). Diğer çok değişkenli istatistiksel analiz tekniklerinden farklı olarak varsayımlardan bağımsız bir teknik olan uyum analizinde ilk olarak nesnel ve özellikler arasında bir ilişkinin varlığına dair kanıt aranır. Bu kontrol, Ki-kare değeri (*Chi-square value*) üzerinden yapılır: değer ne kadar yüksek ise o kadar güçlü bir ilişki olduğu düşünülür (Hair, Black, Babin, Anderson, Tatham,

2014). Seçilen oyunların duygu durumlarından bağımsız olduğuna dair sıfır hipotezi (Ki-kare = 23,69 ve  $p$ -değeri < 0,0001) reddedilmiş ve bu iki kategorik değişken ilişkili kabul edilmiştir.

Şekil 6'da verilen algı haritasına göre Creative Destruction oyununun hem pandemi öncesi hem de pandemi sonrasında olumsuz yorumlarla ilişkisinin görece daha düşük olduğu söylenebilir. Tam tersine, Knives Out ise her iki dönemde de olumsuz yorumlarla ilişkili görünmektedir. Pixels Unknown BG ile ilgili yorumların pandemi sonrasında görece olumlu hale geldiği, Rules of Survivor oyununa yapılan yorumların ise giderek daha fazla olumsuz duygularla ilişkilendiği yorumu yapılabilir.



Şekil 6. Algı haritası

## 5. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışma, duygu analizi ve konu modellemesi gibi metin madenciliği tekniklerini kullanarak oyun geliştiricilerinin hem kendi ürünlerine ilişkin müşteri davranışlarındaki değişimi eşzamanlı gözlemleyebilmeleri hem de rakipleri ve buldukları pazarın durumunu daha açık bir şekilde görebilmeleri için genel bir çerçeve sunmaktadır. Bu sayede ürünleriyle ilgili mevcut müşterilerinin şikâyetlerini kısa sürede çözerek müşteri memnuniyetini artırabilir ve buldukları pazarda rekabet avantajı elde edebilirler. Bunun yanında, ürünlerinin potansiyel müşterileri tarafından nasıl algılandığına dair bir fikir de edinebilirler. Bu noktada, çeşitli sosyal medya platformlarında birçok sahte hesabın bulunduğu, e-ticaret sitelerinde bile gerçek olmayan ürün yorumları ve değerlendirmelerine rastlandığı gözden kaçırılmamalıdır. Bu yüzden oyun piyasası üzerine yapılacak gelecek araştırmalar, karar aşamasında kullanılacak gerçek veriye ulaşmanın yollarını tartışarak böyle verilerle yapılacak analizler sonucunda daha doğru kararlar verilmesini desteklemeyi amaçlamalıdır.

Android, mobil cihazlarda en yaygın olarak kullanılan işletim sistemi olduğundan ve Google Play, çoğunlukla bireysel geliştiriciler ve üçüncü taraf şirketler tarafından geliştirilen en büyük Android uygulama deposunu sunduğundan, bu çalışmada iOS gibi işletim sistemlerindeki uygulama dükkânlarında yapılan kullanıcı yorumları göz önünde bulundurulmamıştır. Farklı işletim sistemleri farklı demografik segmentlere hitap ediyor olabileceğinden, ileriki çalışmalar Apple Store'da yapılan kullanıcı yorumlarını da analize dâhil ederek işletim sistemleri bu açıdan karşılaştırılabilir. İleriki çalışmalar, çok geniş bir oyuncu kitlesine ulaşır milyarlarca dolarlık

gelir getiren “gündelik” oyunlara (*casual games*) da odaklanabilir. Son olarak, pandeminin etkisinin anlaşılması için belirli bir tarihi kullanarak yapılan sınıflandırmaların sübjektif olduğu yadsınamaz; bu yüzden bu çalışmada önerilen metodolojik çerçevenin daha farklı bir yol izlenerek (örneğin, bir geçiş dönemi olduğu kabul edilerek) uygulanması da gelecekteki çalışmalarda denenebilir.

Bu çalışma kapsamında önerilen Duygu Analizi, Konu Modelleme ve Uyum Analizini içeren bir analiz çerçevesidir. Mobil oyun pazarına uygulanan bu analiz çerçevesi farklı sektör veya ürünlere de uygulanabilir. Örneğin; i) bir ürüne yönelik kullanıcı yorumları belli zaman aralıklarında analiz edilerek kullanıcıların yaklaşımlarındaki değişiklikler ii) yeni ürün geliştirme sürecinde prototip ürünlerin kullanımı sonrası kullanıcı deneyimleri ve geliştirmeye yönelik tercihleri iii) eğitim, sağlık vb. hizmetlere yönelik kullanıcı görüşleri ya da şikayetleri incelenebilir.

## Araştırmacıların Katkısı

Gerçekleştirilen çalışmada Çiğdem Kadaifçi, fikrin oluşturulması ve geliştirilmesi, tasarımın yapılması, literatür taraması, uyum analizi sonuçlarının değerlendirilmesi ve incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında; Erhan Bozdağ, fikrin oluşturulması ve geliştirilmesi, tasarımın yapılması, veri toplanması, gerekli kodlama işlemlerinin yapılması, metin madenciliği sonuçlarının değerlendirilmesi ve incelenmesi başlıklarında; Erkan Işıklı, fikrin oluşturulması ve geliştirilmesi, tasarımın yapılması, literatür taraması, kaynak ve malzemelerin temini, konu modelleme sonuçlarının değerlendirilmesi ve incelenmesi, yazım denetimi ve içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

Acheampong, F. A., Nunoo-Mensah, H. ve Chen, W. (2021). Transformer models for text-based emotion detection: a review of BERT-based approaches. *Artificial Intelligence Review*, 54(8), 5789-5829. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-09958-2>

Acikalin, U. U., Bardak, B. ve Kutlu, M. (2020). Turkish sentiment analysis using BERT. *2020 28<sup>th</sup> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Gaziantep, Türkiye, 5-7 October 2020. <https://doi:10.1109/SIU49456.2020.9302492>

Ahmetoğlu, H. ve Daş, R. (2020). Türkçe otel yorumlarıyla eğitilen kelime vektörü modellerinin duygu analizi ile incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2), 455-463. <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.645579>

Altunel, A. B. (2022). Türkçe metinlerde makine öğrenmesi algoritmalarının duygu analizi problemi üzerindeki performansının kıyaslanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 28, 1056-1061. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1011864>

B2PRESS (2020, Mayıs 6). Pandemi Oyun Sektörünün Gelişimini Nasıl Etkiledi? Erişim adresi: <https://tr.b2press.com/kutuphane/23/pandemi-oyun-sektorunun-gelisimini-nasil-etkiledi>

Barr, M. ve Copeland-Stewart, A. (2022). Playing video games during the COVID-19 pandemic and effects on players' well-being. *Games and Culture*, 17(1), 122-139. <https://doi.org/10.1177/15554120211017036>

Che, S., Nan, D., Kamphuis, P., Zhang, S. ve Kim, J. H. (2022). Examining Crisis Communication Using Semantic Network and Sentiment Analysis: A Case Study on NetEase Games. *Frontiers in Psychology*, 13, 823415. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.823415>

Churchill, R. ve Singh, L. (2022). The evolution of topic modeling. *ACM Computing Surveys*, 54(10s), 1-35. <https://doi.org/10.1145/3507900>

- Ciftci, B. ve Apaydin, M. S. (2018). A deep learning approach to sentiment analysis in Turkish. *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, Malatya, Türkiye, 28-30 September 2018. <https://doi.org/10.1109/IDAP.2018.8620751>
- de Santana Correia, A. ve Colombini, E. L. (2022). Attention, please! A survey of neural attention models in deep learning. *Artificial Intelligence Review*, 55(8), 6037-6124, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10148-x>
- Deepa, D. ve Tamilarasi, A. (2021). Bidirectional encoder representations from transformers (BERT) language model for sentiment analysis task. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(7), 1708-1721. <https://doi.org/10.17762/turcomat.v12i7.3055>
- Demirci, G. M., Keskin, Ş. R. ve Doğan, G. (2019). Sentiment analysis in Turkish with deep learning. *2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Los Angeles, CA, USA, 9-12 December 2019. <https://doi.org/10.1109/BigData47090.2019.9006066>
- Devlin, J. ve Chang, M.-W. (2018, 2 Kasım). Open sourcing BERT: State-of-the-Art pre-training for natural language processing [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://ai.googleblog.com/2018/11/open-sourcing-bert-state-of-art-pre.html>
- Gaming in Turkey Oyun ve Spor Ajansı. (t.y.). Türkiye oyun sektörü raporu 2021. Erişim adresi: <https://www.turkiyeoyunsektoruraporu.com/tr/2021-1>
- Godnov, U. ve Redek, T. (2016). Application of text mining in tourism: Case of Croatia. *Annals of Tourism Research*, 58, 162-166. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2016.02.005>
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E. ve Tatham, R. L. (2014). *Multivariate Data Analysis* (7<sup>th</sup> ed.). Essex, UK: Pearson Education Limited.
- Han, Y. ve Moghaddam, M. (2021). Analysis of sentiment expressions for user-centered design. *Expert Systems with Applications*, 171, 114604. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114604>
- Hoffman D. L. ve Franke, G. R. (1986). Correspondence analysis: graphical representation of categorical data in marketing research. *Journal of Marketing Research*, 23(3), 213-227. <https://doi.org/10.1177/002224378602300302>
- Hossain, M. S. ve Rahman, M. F. (2022). Detection of potential customers' empathy behavior towards customers' reviews. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 65, 102881. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2021.102881>
- Işıklı, E. (2021). Metin madenciliğinin talep planlamadaki rolünün incelenmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 32(2), 286-306. <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.796901>
- Kilimci, Z. H., Yörük, H. ve Akyokus, S. (2020). Sentiment analysis based churn prediction in mobile games using word embedding models and deep learning algorithms. *2020 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, Novi Sad, Serbia, 24-26 August 2020. <https://doi.org/10.1109/INISTA49547.2020.919462>
- Kim, J. ve Lim, C. (2021). Customer complaints monitoring with customer review data analytics: An integrated method of sentiment and statistical process control analyses. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101304. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101304>
- Küçükvardar, M. ve Türel, E. (2022). Covid-19 Pandemisinde Dijital Oyun Oynama Düzeyi Üzerine Bir Araştırma. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 47, 47-58. <https://doi.org/10.52642/susbed.1010309>
- Li, X., Zhang, Z. ve Stefanidis, K. (2021). A data-driven approach for video game playability analysis based on players' reviews. *Information*, 12(3), 129. <https://doi.org/10.3390/info12030129>



- Marcolin, C. B., Becker, J. L., Wild, F., Behr, A. ve Schiavi, G. (2021). Listening to the voice of the guest: A framework to improve decision-making processes with text data. *International Journal of Hospitality Management*, 94, 102853. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2020.102853>
- Masarifoglu, M., Tigrak, U., Hakyemez, S., Gul, G., Bozan, E., Buyuklu, A. H. ve Özgür, A. (2021). Sentiment analysis of customer comments in banking using BERT-based approaches. *2021 29<sup>th</sup> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Istanbul, Turkey, 9-11 June 2021. <https://doi.org/10.1109/SIU53274.2021.9477890>
- Mehta, M. P., Kumar, G. ve Ramkumar, M. (2021). Customer expectations in the hotel industry during the COVID-19 pandemic: A global perspective using sentiment analysis. *Tourism Recreation Research*, 48(1), 110-127. <https://doi.org/10.1080/02508281.2021.189469>
- Motion Picture Association. (2022, Mart). Theatrical and home entertainment market environment THEME report 2021. Erişim adresi: <https://www.motionpictures.org/wp-content/uploads/2022/03/MPA-2021-THEME-Report-FINAL.pdf>
- Myšková, R. ve Hájek, P. (2020). Mining risk-related sentiment in corporate annual reports and its effect on financial performance. *Technological and Economic Development of Economy*, 26(6), 1422-1443. <https://doi.org/10.3846/tede.2020.13758>
- Onan, A. (2020). Evrişimli sinir ağı mimarilerine dayalı Türkçe duygu analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Özel Sayı, 374-380. <https://doi.org/10.31590/ejosat.780609>
- Pashchenko, Y., Rahman, M. F., Hossain, M. S., Uddin, M. K. ve Islam, T. (2022). Emotional and the normative aspects of customers' reviews. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 68, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2022.103011>
- Qazi, N. ve Wong, B. W. (2019). An interactive human centered data science approach towards crime pattern analysis. *Information Processing & Management*, 56(6), 102066. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102066>
- Qu, S., Zhang, Y., Ji, Y., Wang, Z. ve Geng, R. (2023). Online-Review-Driven Products Ranking: A Hybrid Approach. *Systems*, 11(3), 148. <https://doi.org/10.3390/systems11030148>
- Raza, S. ve Ding, C. (2022). News recommender system: A review of recent progress, challenges, and opportunities. *Artificial Intelligence Review*, 55, 749-800. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10043-x>
- Ren, Y. ve Li, J. (2020). Research on user satisfaction of mobile game in Chinese style based on sentiment analysis. *International Conference on Economics, Education and Social Research (ICEESR 2020)*, Lanzhou, China, 25-26 July 2020. <https://doi.org/10.25236/iceesr.2020.186>
- Schmiedel, T., Müller, O. ve Vom Brocke, J. (2019). Topic modeling as a strategy of inquiry in organizational research: A tutorial with an application example on organizational culture. *Organizational Research Methods*, 22(4), 941-968. <https://doi.org/10.1177/1094428118773858>
- Sensor Tower (2022). The state of mobile game monetization 2022-An analysis of the latest mobile game monetization strategies. Erişim adresi: <https://go.sensortower.com/rs/351-RWH-315/images/st-state-of-mobile-game-monetization-2022.pdf>
- Sığirci, İ. O., Özgür, H., Oluk, A., Uz, H., Çetiner, E., Oktay, H. U. ve Erdemir, K. (2020). Sentiment analysis of Turkish reviews on Google Play Store. *2020 5<sup>th</sup> International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, Diyarbakır, Türkiye, 9-11 September 2020. <https://doi.org/10.1109/UBMK50275.2020.9219407>
- Smirke, R. (2022, 22 Mart). IFPI global report 2022: Music revenues rise for seventh straight year to \$25.9B [PDF belgesi]. Erişim adresi: <https://www.billboard.com/wp-content/uploads/2022/03/march-22-2022-billboard-bulletin.pdf>
- The Gaming Market in Turkey. (2022, 5 Mart). Erişim adresi: <https://allcorrectgames.com/insights/the-turkish-game-market>

Tuzcu, S. (2020). Çevrimiçi kullanıcı yorumlarının duygu analizi ile sınıflandırılması. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 1(2), 1-5.

Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, Ł. ve Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *31<sup>st</sup> Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*, Long Beach, CA, USA, 4-9 December 2017.

Wang, X. ve Goh, D. H.-L. (2020). Components of game experience: An automatic text analysis of online reviews. *Entertainment Computing*, 33, 100338. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2019.100338>

Wang, X., Zheng, J., Tang, L. R. ve Luo, Y. (2023). Recommend or not? The influence of emotions on passengers' intention of airline recommendation during COVID-19. *Tourism Management*, 95, 104675. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2022.104675>

Wijman, T. (2021, 22 Aralık). The games market and beyond in 2021: the year in numbers [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://newzoo.com/insights/articles/the-games-market-in-2021-the-year-in-numbers-esports-cloud-gaming>

Xu, H., Zhang, Y. ve DeGroof, R. (2018). A feature-based sentence model for evaluation of similar online products. *Journal of Electronic Commerce Research*, 19(4), 320-335.

Yu, Y., Dinh, D. T., Nguyen, B. H., Yu, F. ve Huynh, V. N. (2023). Mining Insights from Esports Game Reviews with an Aspect-Based Sentiment Analysis Framework. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3285864>



# Journal of Turkish Operations Management

## Proje çizelgelemede bulanık doğrusal programlama ile yeni bir yöntem önerisi: Yazılım projesinde uygulama

Vildan Çorumlu<sup>1</sup>, Kumru Didem Atalay<sup>2\*</sup>, Esra Dinler<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Başkent Üniversitesi, Ankara  
e-mail: vildancorumlu@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-6700-0748>

<sup>2</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Başkent Üniversitesi, Ankara  
e-mail:katalay@baskent.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-9021-3565>

<sup>3</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Başkent Üniversitesi, Ankara  
e-mail:edinler@baskent.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-8868-8484>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 14.02.2023

Revize: 13.10.2023

Kabul: 14.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Proje çizelgeleme,  
Bulanık kritik yol metodu,  
Üyelik fonksiyonu,  
Bulanık doğrusal programlama,  
PERT,  
Yazılım Projeleri

### Özet

Projeler, başlangıç ve bitiş tarihi belli olan bir zaman diliminde kaynakların verimli bir şekilde kullanılarak çıktıların elde edildiği çalışmalardır. Proje çıktısının hızlı bir şekilde elde edilebilmesi, pazarda rekabet avantajının sağlanabilmesi amacıyla önemlidir. Bu nedenle, projenin zamanında tamamlanması ön plana çıkmaktadır. Bu aşamada proje çizelgeleme konusu büyük önem taşımaktadır. Proje çizelgelemede kullanılan birçok yöntem vardır ve Kritik Yol Metodu (CPM) ve Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT) bunlara örnek olarak verilebilir. Faaliyet sürelerinin belirsiz olması durumunda bu parametrelerin tahmin edilmesindeki sorunlar nedeniyle, bu yöntemler gerçek projeleri doğru ve tam olarak temsil edemeyebilir. Bulanık teori bu sorunların ortadan kaldırılması ve çizelgelemeyi iyileştirmede temel olarak kullanılan bir yoldur. Bulanık teori, parametrelerdeki belirsizlikleri, kesin olmayan veya eksik bilgiden kaynaklanan durumları dikkate alarak proje çizelgeleme modellerini gerçeğe yaklaştırır. Bu çalışmada, projenin faaliyet sürelerinde belirsizlik olması durumunda projenin tamamlanma sürelerinin belirlenmesinde bulanık doğrusal programlamayı temel alan yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemin değerlendirilmesi için gerçek bir yazılım projesinde uygulama gerçekleştirilmiştir. Model sonuçları incelendiğinde üyelik dereceleri azaldıkça proje tamamlanma sürelerinin kıaldığı gözlemlenmiştir.

## A novel method with fuzzy linear programming in project scheduling: Application in software project

### Article Info

#### Article History:

Received: 14.02.2023

Revised: 13.10.2023

Accepted: 14.11.2023

#### Keywords:

Project scheduling,  
Fuzzy critical path method,  
Membership function,  
Fuzzy linear programming,  
PERT,  
Software projects

### Abstract

Projects are the works in which the outputs are obtained by using the resources efficiently in a time with a certain start and end date. Achieving the project output quickly is important in order to gain competitive advantage in the market. For this reason, it is important to complete the project on time. At this stage, the issue of project scheduling comes to the fore. There are many methods used in project scheduling, such as the Critical Path Method and the Program Evaluation and Review Technique. Due to problems in estimating these parameters when activity times are uncertain, these methods may not be able to represent real projects accurately and fully. Fuzzy theory is a fundamental way to eliminate these problems and improve scheduling. The fuzzy theory brings the project scheduling models closer to reality by taking into account the uncertainties in the parameters, the situations caused by imprecise or incomplete information. In this study, a novel method based on fuzzy linear programming is proposed to determine the completion times of the project in case of uncertainty in the activity period of the project. In order to evaluate the proposed method, an application is carried out in a real software project. When the model results are examined, it has been observed that the project completion times shorten as the membership degrees decrease.

## 1. Giriş

Günümüz rekabet ortamında üretimde yeni bir ürünün geliştirilmesi ve pazara sunulması, bir yazılım geliştirilmesi, binaların inşa edilmesi, yeni bir bilgi yönetim sisteminin geliştirilmesi gibi birçok alanda gerçekleştirilen işlerde proje yönetimi önemli bir avantaj olarak görülmektedir. Proje yönetimi, organizasyonların karmaşıklıklarıyla başa çıkmalarına, kaynaklarını etkili bir şekilde kullanmalarına, hedeflere ulaşmalarına ve müşteri memnuniyetini artırmalarına yardımcı olan kritik bir iş sürecidir. Bu nedenle, birçok sektörde proje yönetimi büyük önem taşır ve profesyonel proje yöneticileri bu süreçleri başarıyla yönetmek için eğitilirler. İşletmelerin projelerini iyi bir şekilde yönetebilmesi, planlaması ve doğru zamanda en az maliyet ile tamamlayabilmesi için projede yer alan faaliyetleri çok iyi tanımlaması, faaliyetlere ilişkin süreleri doğru bir şekilde belirlemesi önemli bir konudur.

Proje, bir veya daha fazla tanımlanmış hedefe ulaşmak için harcanan geçici çaba olarak, proje yönetimi ise, tanımlanan proje hedeflerinin gerçekleştirilmesini yönlendirmek ve kontrol etmek için yapılan koordineli faaliyetler olarak tanımlanabilir (ISO 21502:2020 Project, Programme and Portfolio Management, 2020). Proje yönetiminin temel unsurlarından biri proje çizelgelemedir. Başka bir deyişle başarılı bir proje yönetimi için uygun proje çizelgelemenin yapılması gerekir (Habibi, Birgani, Koppelaar ve Radenović, 2018). Proje çizelgeleme problemlerinin çözümü için kullanılan kaynak seviyelendirme ve tahsisi, gantt şeması, ağ analizi yöntemi, matematiksel yöntemler ve simülasyon gibi birçok yöntem vardır (Habibi ve diğ., 2018). Bu süreç, proje yönetimi sürecinin önemli bir parçasıdır ve projenin başarıyla tamamlanabilmesi için hayati bir rol oynar. Bu, projenin zaman çizelgesini gösterir ve proje ekibinin hangi görevler üzerinde çalışacağını gösterir. Bu yöntemlerin çoğu net, deterministik ve kesin yöntemlerdir. Kritik Yol Metodu (CPM), Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT), proje kritik yolunun belirlenmesi için en sık kullanılan ağ analizi yöntemleridir (Chwastyk ve Pisz, 2020).

CPM' in amacı, projedeki kritik faaliyetlerin belirlenmesi ve gerektiğinde bu faaliyetler için ek kaynak ataması yapılarak projenin daha kısa sürede tamamlanmasını sağlamaktır. Ayrıca bu yöntem ile projedeki dar boğazlar belirlenebilmektedir. Ancak proje aktivite süreleri genellikle belirsizlik içerdiğinde klasik CPM ile yapılan hesaplamalar gerçek durumu tam olarak yansıtamamaktadır (Shankar, Sireesha ve Rao, 2010). Her görevin tamamlanma süresi tahmin edilir. Bu tahminler, geçmiş projelerden elde edilen verilere, uzman görüşlerine veya diğer yöntemlere dayanabilir ve net değildir. Bu gibi durumlarda, belirsizlik ile başa çıkmak için bulanık programlama ve stokastik optimizasyon gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Belirsizlik rastgelelik ve bulanıklık olarak farklı kavramlar kullanılarak ele alınabilir. Rastgelelik içeren belirsizliğin olması durumunda en yaygın yöntem olan PERT ile faaliyet sürelerini belirlerken, karşılık gelen dağılımın ve parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için tarihsel bir veriye sahip olmak gerekir. Ancak birçok gerçek hayat problemlerinde yeterli tarihsel veri olmaması nedeni ile iyi bir tahmin yapılamaz (Atlı ve Kahraman, 2013). Bu durumlarda proje aktivite sürelerindeki belirsizliği ortadan kaldırmak için bulanık mantık yaklaşımı tercih edilebilir. Bulanıklık olayın belirsizliği ile ilgilidir ve bir olayın meydana gelip gelmediğini değil meydana gelme derecesini ölçer (Li ve Wei, 2007). Ait olma derecesini ölçen fonksiyona üyelik fonksiyonu denir. Bu fonksiyon, belirli bir küme içindeki bir elemanın o kümenin alt kümesine ait olma derecesini ifade eden matematiksel bir fonksiyondur. Bu kavram, bulanık küme teorisinde ve bulanık mantıkta kullanılır. Kuralların belirlenmesi ve kararların verilmesi için kullanılan bu fonksiyon, belirsizlik içeren problemlerde ve sistemlerde başarıyla kullanılabilir ve bulanık mantık kuralları oluşturulmasına yardımcı olur.

Ağ analizi, karmaşık iş veya proje süreçlerini, görevleri, bağımlılıkları ve kaynakları modellemek, planlamak, izlemek ve yönetmek için kullanılan bir yöntemdir. Ağ analizi, proje yönetimi, iş süreç yönetimi, lojistik ve birçok farklı sektördeki projelerin ve süreçlerin daha etkili bir şekilde planlanmasına ve yürütülmesine yardımcı olur. Bu yöntem, zaman ve kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını sağlar ve projenin veya sürecin başarıya ulaşma şansını artırır. Ayrıca, iş süreçlerini iyileştirmek ve verimliliği artırmak için kullanılabilir. Ağ analizi yöntemlerinde proje faaliyet sürelerinde belirsizlik durumunun söz konusu olması nedeni ile 1970'lerin sonlarında bulanık CPM ortaya çıkmıştır. Proje planlamasında sürelerin doğru tahmin edilmesi proje maliyeti için çok önemlidir. Bu nedenle belirsiz sürelerin uygun yöntemler ile ele alınması proje çizelgelemede zaman, maliyet, performans ve kalite parametreleri açısından önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır (Sadjadi, Pourmoayed ve Aryanezhad, 2012). Bulanık küme teorisi, uzmanların görüş ve deneyimlerini daha doğru, gerçeğe daha yakın bir biçimde proje planlamasına girdi olarak kullanılabilir. Proje çizelgelemede bulanık küme teorisinin kullanımı ile stokastik örneklerle ve istatistiksel hesaplamalara gerek kalmaz, bu modellerde uzmanların zihinsel çıkarımı, deneyimi ve görüşleri doğrudan kullanılabilir (Habibi ve diğ., 2018). Bulanık proje çizelgeleme, belirsizliklerle dolu karmaşık projeleri daha iyi yönetmek ve daha iyi kararlar almak için bir araç olarak giderek daha fazla kabul görmektedir.

Bu çalışmada proje faaliyet sürelerindeki belirsizliği göz önünde bulundurarak projenin tamamlanma süresini ve projenin zamanında tamamlanması için hangi faaliyetlerin kritik olduğunu belirlemek amacı ile bulanık doğrusal programlama modeli kullanılarak proje çizelgeleme gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen yöntem bir yazılım firmasında

gerçek problem üzerinde uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde bulunan bulanık proje çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde, genel olarak bulanık sayılarla çalışıldığı, ancak üyelik fonksiyonlarını hesaba katarak bir modellemenin yapılmadığı gözlenmiştir. Kullanılan üyelik fonksiyonları kısıtlar ve amaç fonksiyonu için ayrı ayrı tanımlanmış ve matematiksel modelin oluşturulması için modele dahil edilmiştir. Ayrıca farklı üyelik derecelerine ait proje tamamlanma süreleri bulunarak karar vericiye öngörü ve esneklik sağlanmıştır. Önerilen yöntem ilk kez bu çalışmada bir yazılım projesinde kullanılmıştır. Faaliyet sürelerinde ele alınan tolerans değerleri sürelerin bulanık teori ile modellenmesine olanak sağlamış ve bu bulanıklık üyelik fonksiyonları ile tanımlanarak belirli bir yapıya dönüştürülerek çözülmüştür. Bu yönleriyle bu çalışma faaliyet sayılarının fazla olduğu ve proje zamanlarının bulanıklık içermesi sebebiyle belirsiz olduğu proje çizelgeleme problemleri için uygun ve kullanışlı bir yöntem olarak literatüre katkı sağlayacaktır. Bu yöntem kullanım kolaylığı yanı sıra analitik bir yapıya sahip olması nedeniyle güvenle uygulanabilir ve karar vericilere yol gösterici olabilir. Projenin farklı senaryolarını simüle etme ve analiz etme olanağı sağlar ve proje sonuçlarını tahmin etmek ve optimize etmek için güçlü bir araç olabilir. Ayrıca önerilen yaklaşım yeni bilgiler veya koşullar ortaya çıktığında zaman çizelgesini daha esnek bir şekilde güncelleme olanağı sağlar.

Çalışmanın ikinci bölümünde bulanık proje çizelgeleme ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar verilmiştir. Üçüncü bölümde önerilen çözüm yöntemine ilişkin bilgiler, dördüncü bölümde gerçekleştirilen uygulama ve elde edilen sonuçların analizi, beşinci bölümde sonuçların karşılaştırılması ve son bölümde sonuçlar ve öneriler verilmektedir.

## 2. Literatür taraması

Çalışmanın bu bölümünde proje çizelgeleme ve bulanık proje çizelgeleme hakkındaki literatür taramasına yer verilmiştir. Gerçek hayat uygulamalarında proje faaliyet süreleri bilgi eksikliği veya karşılaşılan birçok durum nedeni ile belirsiz olabilir. Bu nedenle proje çizelgelemede bu belirsizliğin ele alındığı birçok çalışma yer almaktadır.

Habibi ve diğ. (2018), proje yönetiminin başarısı için en önemli faktörün doğru çizelgeleme olduğunu savunmuşlardır. Proje çizelgeleme amacı ile sık kullanılan klasik yöntemlerin belirsizlik ve gerçek durumları tam olarak yansıtmadığını düşünerek klasik yöntemlere (CPM ve PERT) bulanık küme teorisinin uygulandığı yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışmanın sonunda önerdikleri yöntem ile klasik yöntemlerin karşılaştırmasını yapmışlar ve karşılaştırma sonucunda yamuksal bulanık sayılar ile tanımlanan yöntemin klasik yöntemlere göre belirsizlik etkisini önemli ölçüde azalttığını, tahmini proje süresi ve maliyette göreceli bir iyileşme sağladığını göstermişlerdir. Chwastyk ve Pisz (2020), yaptıkları çalışmada proje ağındaki aktivite sürelerini sıralı bulanık sayılar ile tanımlayarak CPM için yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Çalışmalarında yeni yaklaşıma, teorik temellere ve sayısal bir örnek üzerinden hesaplamalara yer vermişlerdir. Atlı ve Kahraman (2013), çalışmalarında, bulanık proje çizelgeleme problemlerine yer vermişlerdir. Bu problemlerin çözümü için faaliyet sürelerinin bulanık sayılar ile belirtildiği bir proje şebekesinde kritik yol analize yönelik olarak bulanık aritmetik yaklaşım ile doğrusal programlama yöntemini kıyaslamışlardır. Madhuri, Saradhi ve Shankar (2013), yaptıkları çalışmada bulanık bir proje ağındaki kritik yolu bulabilmek için tüm aktivite sürelerini yamuk bulanık sayılar ile tanımlamış ve yeni bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelin sonuçlarını sayısal bir örnek üzerinden göstermişler ve klasik doğrusal programlamaya göre önerilen yeni yöntemin çözümünde daha az kısıt fonksiyonu olması nedeni ile daha iyi bir uygulama olabileceğini göstermişlerdir. Sireesha, Rao, Shankar ve Babu (2012), bulanık bir proje ağındaki kritik yolu bulabilmek için aktivite sürelerini bulanık aralık sayılar ile tanımlayan yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemi sayısal bir örnek ile göstermiş ve sonuçlarını yorumlamışlardır. Saradhi, Ramesh, Shankar ve Shaik (2021), insan belirsizliğini ifade etmek üzere son derece yararlı olduğunu düşündükleri kararsız bulanık küme teorisini uygulamak için bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada proje ağındaki her bir aktiviteyi üçgensel kararsız bulanık küme kullanarak tanımlamış ve proje ağındaki en iyi yolu seçebilmek için çok kriterli karar verme tekniği olan İdeal Çözüme Benzerliğine Göre Tercih Sıralaması Tekniği (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)) kullanılmış ve sayısal bir örnek ile sonuçları paylaşmışlardır. Jayagowri ve Geetharamani (2015), sezgisel bulanık proje ağındaki kritikliği ölçmek için analitik bir yöntemi çalışmalarında sunmuşlardır. Yeni yöntemde sezgisel yamuksal bulanık sayıları kullanarak kritik yolu hesaplamışlardır. Mazlum ve Güneri (2015), klasik CPM, PERT ve bulanık yaklaşım üzerinde çalışmışlar ve bu yöntemleri birleştirerek çizelgelemeyi iyileştirmek için elde edilen sonuçları analiz etmişlerdir. Farklı çizelgeleme yöntemlerinin sonuçları arasında önemli bir fark olmadığı sonucuna varmışlardır. Chen ve Hsueh (2008), bulanık aktivite sürelerinin olduğu kritik yol problemini çözmek için basit bir yaklaşım geliştirmişler ve Yager'in sıralama yöntemini temel almışlardır. Bu yöntem ile bulanık kritik yol problemini doğrusal programlama ile çözmüşler ve yolların kritiklik derecelerini belirlemişlerdir. Durucasu, İcan, Karamaşa, Yeşilaydın ve Gülcan (2015), gerçek bir inşaat projesi uygulaması üzerinden proje kritik yolunu belirlemişlerdir. Proje faaliyetlerinin gerçeği daha iyi yansıtaçağını düşünerek üçgensel bulanık sayılar ile tanımlamışlar ve ortaya çıkan bulanık kritik yol problemini çözmek için Chen'in alfa kesim yaklaşımını kullanmışlardır. Elde edilen sonuçları değerlendirebilmek için en sık kullanılan durulaştırma yöntemlerinden olan ağırlık merkezi yöntemini ve proje kritik yolunu garantileyen

Yager'in sıralama yöntemini kullanmışlardır. Sethupathy, Judson ve Paul (2020), zaman-maliyet optimizasyonunun proje çizelgeleme sürecindeki ana engellerden biri olduğunu savunmuşlar ve yaptıkları çalışma ile zaman-maliyet optimizasyonu için bulanık mantık yaklaşımını kullanarak yeni bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem ile karar verici, bir teklif sunulmadan önce proje teslim tarihinin toplam proje maliyeti üzerindeki etkisini kolaylıkla tahmin edebilir hale gelebilecektir. Han, Chung ve Liang (2006), bulanık CPM'i literatürdeki diğer çalışmalardan biraz daha farklı olarak havalimanının yer kritik operasyon süreçlerini bulmak ve iyileştirmek için kullanılmışlardır. Çalışmada yamuk bulanık sayıları, bunlar ile ilgili matematiksel işlemleri tanımlamış ve sayısal bir örnek ile sonuçları paylaşmışlardır. Liang, Huang ve Yang (2012), yaptıkları çalışmada bulanık amaç ve bulanık maliyet katsayıları ile kesin olmayan proje yönetimi karar problemlerini çözmek için bir bulanık matematiksel programlama yaklaşımı sunmayı amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışma ile bulanık proje problemlerine çözüm getirilebildiğini ve sistematik bir karar verme metodunun elde edildiğini göstermişlerdir. Castro-Lacouture, Süer, Gonzalez-Joaqui ve Yates (2009), inşaat projelerinde öngörülemez malzeme kısıtının yaşanması nedeni ile bulanık matematiksel programlamanın kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında klasik kritik yol yöntemi hesaplamaları, proje yönetimi yazılımı ve matematiksel modeller kullanılarak analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda duyarlılık analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiş, bulanık matematiksel modelin proje ağ analizinde kullanılabilirliği gösterilmiştir. Ammar ve Abd-ElKhalek (2022) çalışmalarında bulanık aktivite sürelerine sahip bir proje ağında kritikliği ölçmek için analitik bir yöntem sunmuşlardır. Hem proje yollarının hem de faaliyetlerin kritiklik derecesini ölçmek amacı ile bu yöntemi önermişlerdir. Elkalla, Elbeltagi ve El Shikh (2021) çalışmalarında, bulanık doğrusal programlama problemini simetrik olmayan bulanık üyelik fonksiyonları ile karşılık gelen en yakın simetrik olana dönüştürerek çözmek için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Dönüştürülen problem daha sonra kesin sayılara sahip doğrusal programlama problemine dönüştürülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir. Subulan (2020), yaptığı çalışmada belirsizlik içeren Kurumsal Kaynak Planlama (KKP) yazılım ve uyarlama projesi kapsamında aktivite süreleri ve insan kaynağı gereksinimleri gibi tüm proje parametrelerine ait belirsizlikleri, çizelgeleme problemine dahil edebilmek için aralık programlama temelli çözüm yaklaşımını kullanmıştır. Başar (2022), çalışmasında kaynak kısıtlı projelerin çizelgenmesi için yeni bir matematiksel model önermiştir. Fakat projelerin faaliyet sayılarının fazla olduğu durumlarda işlemlerin karmaşık olması nedeni ile önerilen yöntem hibrit meta sezgisel yaklaşım ile ele alınmıştır.

Çalışmalar incelendiğinde bulanık teorisinin avantajlarından proje çizelgeleme konusunda da faydalandığı ve iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak çalışmalarda genel olarak üçgen bulanık sayılar ve  $\alpha$  kesme kümesine dayalı yöntemler üzerine odaklanılmış ve CPM'e ait herhangi bir bulanık matematiksel model yaklaşımı kullanılmamıştır. Bu çalışmada literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak CPM için Zimmermann (1983)'in amaç fonksiyonu ve sağ taraf sabitlerinin bulanık olduğu bulanık doğrusal programlama yaklaşımı ile yeni bir çözüm yöntemi önerilmektedir. Önerilen bu yeni yaklaşım literatürde yer almamaktadır. Soysal, Dengiz ve Atalay (2021), faaliyet sürelerinin stokastik olması durumunda, kaynak kısıtlı çok modlu çoklu proje çizelgeleme problemini ele almışlardır. Ele alınan problem, şans kısıtlı programlama modeli olarak formüle edilmiştir.

### 3. Yöntem

Bu bölümde çalışmanın temeli olan proje çizelgelemede kullanılan CPM ve PERT metodlarına yer verilmektedir. Ayrıca çalışmada önerilen çözüm yöntemi için temel bilgilere ve çözüm yönteminin adımları anlatılmaktadır.

#### 3.1. Proje çizelgelemede CPM ve PERT yöntemleri

CPM, Kelly ve Walker tarafından 1957 yılında Dupont'daki kimya fabrikasının inşa ve bakımına yardımcı olmak amacıyla geliştirilen bir proje faaliyet planlama yöntemidir. CPM projede yapılacak aktivitelerin sürelerinin belirli olduğunu ve kesinlikle bilindiğini varsayar çünkü benzer projeler daha önce birçok kez yapılmıştır. Yeterli deneyim ve bilgi birikimi bulunduğundan, faaliyet süreleri belirli olarak kabul edilir. Beklenmedik bazı nedenlerle, bu sürelerden sapmaların olması doğaldır, fakat çoğunlukla faaliyet zamanları, beklenen zamanlara uygun olarak gerçekleşir. Bu durum gerçek hayat problemlerinde bu yöntem için bir dezavantajdır. CPM projenin tamamlanması için gerekli faaliyetleri tek bir planda toplayarak, faaliyetlerin öncelik ilişkilerini ve sürelerini göstererek projenin kontrolüne yardımcı olur. CPM'in amacı, kritik yol üzerindeki faaliyetleri belirleyerek proje uzunluğunu azaltmak ve kaynakların bu faaliyetlere konsantre olabilmelerini sağlamaktır (Shankar ve diğ., 2010). CPM tekniği ile kritik yolun belirlenmesi basit ve hesaplaması kolay olduğu için birçok sektörde farklı proje türlerinde kullanılmaktadır. Ancak gerçek hayat probleminde farklı faaliyetlerle ilgili zamanların tam olarak mevcut olmadığı birçok durum vardır. Bu gibi durumlarda, belirsizlik ile başa çıkmak için bulanık programlama ve stokastik optimizasyon gibi farklı yöntemler kullanılabilir. Rastgelelikten kaynaklanan belirsizlik durumunda kullanılacak yöntemlerden PERT tekniği ilk olarak 1958 yılında, Amerikan Deniz Kuvvetleri tarafından yürütülen ve Polaris Projesi olarak adlandırılan, füze fırlatan denizaltı yapımı projesinde uygulanmıştır. PERT tekniği, büyük ve karmaşık projelerin planlanması ve programlanmasını basitleştirmek amacı ile geliştirilmiştir. PERT yönteminde faaliyetlerin tamamlanma sürelerinin beklenen değerleri ile işlem yapılmaktadır. Bu yöntemde süreler beta dağılımına sahiptir

ve her aktivite için iyimser, olabilir ve kötümser olmak üzere üç tahmin yapılarak projenin kritik yolu belirlenir (Kenar, 2021). Bu yöntemde birçok basitleştirici varsayım ele alınmıştır, bu nedenle aktivite sürelerinin olasılık dağılımlarının beta dağılımından farklı olduğu varsayımları altında da çalışmalara yoğun olarak yer verilmiştir.

CPM ve PERT tekniklerinde ağ gösterimi ile tüm proje faaliyetleri ve aralarındaki ilişkiler gösterilebilmektedir. Projenin başlangıç aşamasında kritik faaliyetlerin belirlenmesi ile risk önleme çalışmalarına katkı sağlanabilir. Farklı projelerde ve sektörlerde uygulanabilir. Projenin sadece süre açısından değil maliyet açısından da takip edilebilmesine olanak sağlarlar. Bu gibi avantajların yanında proje faaliyetleri açık olarak tanımlanamadığı ve aralarındaki ilişkilerin belirlenemediği durumlarda bu yöntemler tam anlamı ile uygulanamaz. Faaliyetlerin süre tahminleri genelde öznel ve karar vericilerin görüşlerine bağlıdır, bu da hata yapılma olasılığını arttırmaktadır. Faaliyet sürelerinin deterministik bir yapıda olması nedeni ile belirsizlik etkisi değerlendirilememektedir.

### 3.2. Bulanık küme teorisi

CPM ve PERT tekniklerinde karşımıza çıkan olumsuz durumların ortadan kaldırılabilmesi için bulanık küme teorisinden yararlanılabilir. Zadeh (1965) tarafından önerilen bulanık küme teorisi, proje ortamı da dahil olmak üzere belirsiz ve bulanık verilerle, bulanık ortamla ilgilenmektedir. Karar verme süreçlerinde belirsizlik önemli bir yere sahiptir. Bulanık küme teorisi, oyun teorisinde ve ağ problemleri, yöneylem araştırması, doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, hedef programlama, dinamik programlama, ulaştırma modelleri, envanter yönetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Chwastyk ve Pisz, 2020).

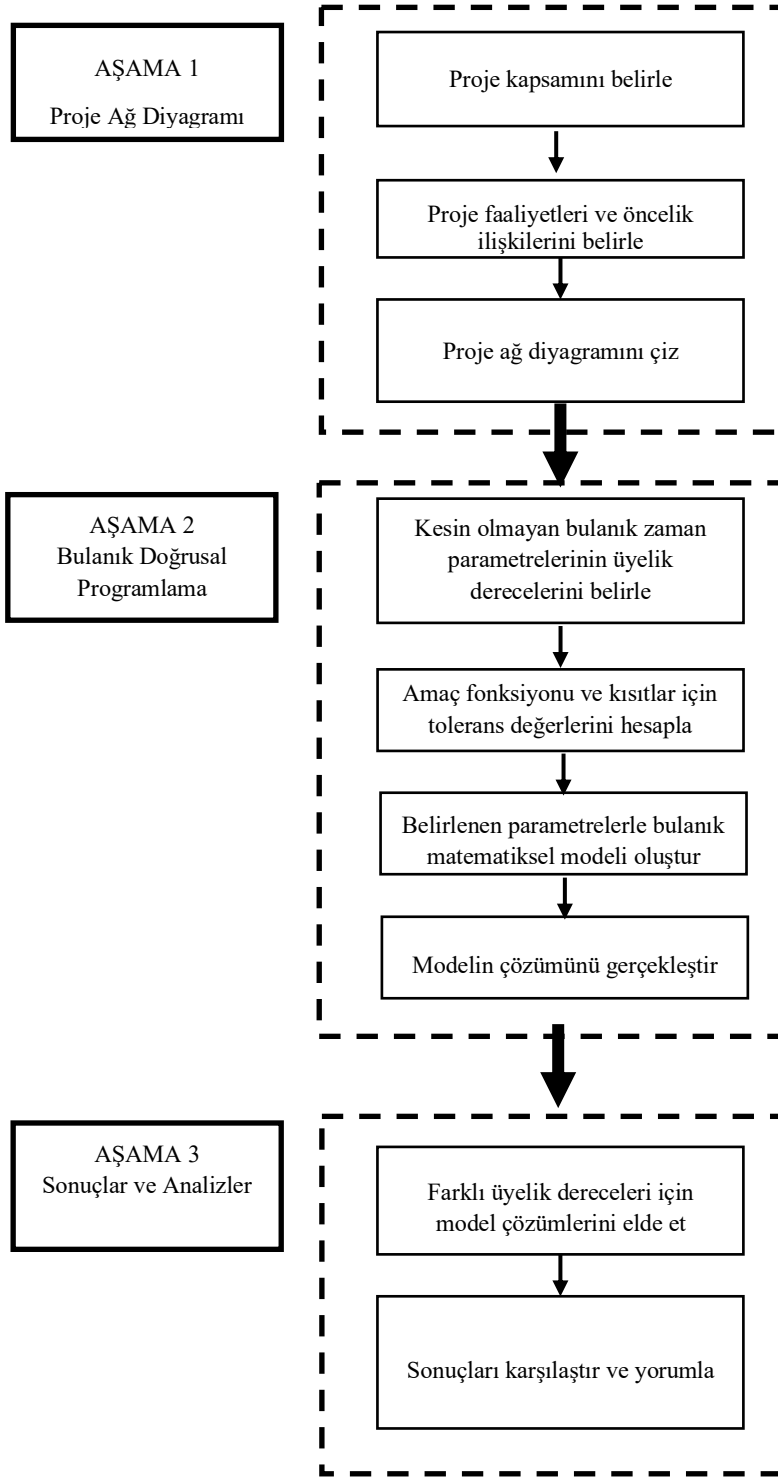
Bulanık aktivite süresi yaklaşımının savunucuları, geçmiş verilerin eksikliğinden dolayı aktivite süreleri için olasılık dağılımlarının bilinmediğini savunmaktadır (Chanas ve Zieliński, 2001). Faaliyet sürelerinin, genellikle tekrarlanmayan ve hatta benzersiz bir ortamda uzmanlar tarafından tahmin edilmesi gerektiğinden, proje yönetimi genellikle belirsiz ve kesin olmayan yargılayıcı ifadelerle karşı karşıya kalır. Belirsizlikten ziyade belirsizliği içeren durumlarda, bulanık küme çizelgeleme literatürü, aktivite sürelerini modellemek için rasgele değişkenler yerine bulanık sayıların kullanılmasını önerir (Herroelen ve Leus, 2005). Kesin olmayan verilerle başa çıkmanın alternatif bir yolu, belirsiz aktivite sürelerinin bulanık sayılarla temsil edilebildiği bulanıklık kavramını kullanmaktır. Bulanık sayılar, belirsiz aktivite sürelerini tanımlamak için kullanılır ve bunların tahmininde belirsizlik ve öznellik hesaplamalara yansıtılır (Madhuri ve diğ., 2013).

### 3.3. Çalışmada önerilen yöntem

Çalışmada önerilen yöntemde konusu ve kapsamı belirlenmiş bir projede, proje faaliyetleri ve öncüllük ilişkileri ile proje ağ diyagramı oluşturulur. Sonrasında kesin olmayan bulanık zaman parametrelerine ilişkin üyelik dereceleri belirlendikten sonra amaç fonksiyonu ve kısıtların sağ taraf sabitleri (faaliyet süreleri) için tolerans değerleri belirlenir. Tüm değerlerin belirlenmesinden sonra bulanık matematiksel model oluşturulur ve çözümü gerçekleştirildikten sonra sonuçlar elde edilir.

Çalışma kapsamında projede yer alan faaliyet sürelerindeki belirsizlik için bulanık matematiksel model kullanılmıştır. Önerilen yeni yöntem, kritik yol analizi için Zimmermann yaklaşımında kullanılan yöntemin kritik yol analizine uyarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Zimmermann yaklaşımında yer alan matematiksel modelde sağ taraf sabitlerinin bulanık olması durumunda gerçekleştirilen çözüm yöntemi, bulanık matematiksel modelde sağ taraf sabitleri yani faaliyet sürelerine uygulanarak belirsizlik ele alınmıştır. Ayrıca oluşturulan matematiksel modelde amaç fonksiyonu da bulanıklık içermektedir. Çalışmada önerilen yöntemle ilişkin akış şeması Şekil 1'de verilmektedir.





Şekil 1. Önerilen yönteme ilişkin akış şeması

Çalışmada bulanık matematiksel modelin oluşturulmasında kritik yol analizi için önerilen matematiksel model kullanılmıştır. Doğrusal programlama ile kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modele ait karar değişkeni ve parametreler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

Karar değişkeni

$$x_j \quad j. \text{ olayın başlama zamanı } j = 1, \dots, n$$

Parametreler

$$t_{ij} \quad (i, j) \text{ faaliyetinin süresi}$$

Matematiksel modelin genel hali ise Eş. 1-3'te verildiği gibidir:

$$Enk \ z = x_n - x_1 \quad (1)$$

$$x_j \geq x_i + t_{ij} \quad \forall (j, i) : i, j' \text{nin öncülü} \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modelde Eş. 1 ile verilen amaç fonksiyonu projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesidir. Eş. 2 ile verilen kısıtlar her bir öncüllük ilişkisi için bir görevin tamamlanmadan diğer görevin başlamayacağını garanti etmektedir. Eş. 3 ile verilen kısıtlar ise karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlamaktadır. Kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modelde, faaliyet sürelerinin belirsiz olması durumunda bulanık doğrusal programlama uygun bir yaklaşımdır. Bu sebeple amaç fonksiyonu ve kısıtlar bulanık olarak ele alınmıştır. Buna göre, bulanık kısıt ve amaç fonksiyonlarına sahip bulanık doğrusal programlama modeli Eş. 4-6 ile verilmiştir.

$$\widetilde{Enk} \ z = cx \quad (4)$$

$$(Ax)_i \geq \widetilde{b}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

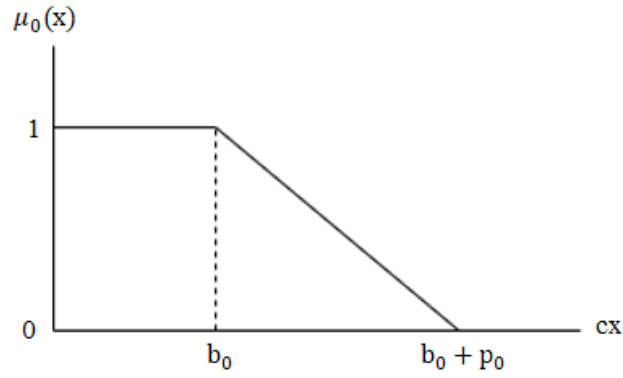
$$x \geq 0 \quad (6)$$

Yukarıdaki bulanık doğrusal programlama modelinin çözümü için Zimmermann (1983) tarafından geliştirilen yaklaşım kullanılmıştır. Bulanık amaç fonksiyonu ve bulanık kısıtlara ait üyelik fonksiyonları sırasıyla Eş. 7 ve Eş. 8 ile verilmiştir (Lai ve Hwang, 1992).

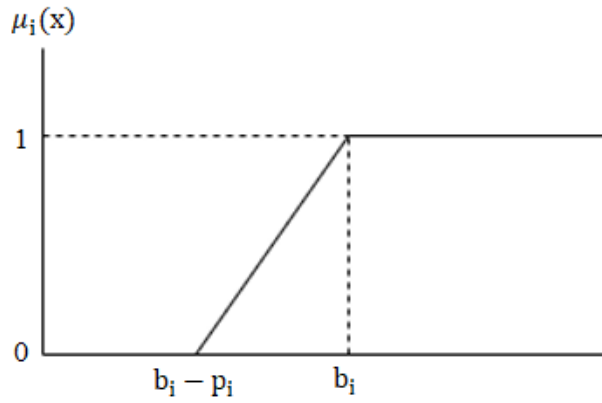
$$\mu_0(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer, } cx < b_0 - p_0 \\ 1 - \frac{cx - b_0}{p_0} & \text{eğer, } b_0 \leq cx \leq b_0 + p_0 \\ 1 & \text{eğer, } cx > b_0 + p_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer, } (Ax)_i < b_i - p_i \\ 1 - \frac{b_i - (Ax)_i}{p_i} & \text{eğer, } b_i - p_i \leq (Ax)_i \leq b_i \\ 1 & \text{eğer, } (Ax)_i > b_i \end{cases} \quad (8)$$

Burada, bulanık amaç fonksiyonu için  $[b_0, b_0 + p_0]$  aralığında olup tolerans değeri  $p_0$  olarak ifade edilir. Benzer şekilde bulanık kısıtlar  $[b_i, b_i + p_i]$  aralığındadır ve tolerans değerleri  $p_i$  'dir. Eş. 7 ile verilen bulanık amaç fonksiyonuna ait üyelik fonksiyonu ( $\mu_0(x)$ ), artmayan sürekli doğrusal bir fonksiyondur ve Şekil 2'de gösterilmektedir. Eş. 8 ile verilen bulanık kısıtlara ait üyelik fonksiyonları ( $\mu_i(x)$ ;  $i = 1, \dots, m$ ), azalmayan sürekli doğrusal bir fonksiyondur ve Şekil 3'te gösterilmektedir.  $\lambda$  ise üyelik derecelerinin alt sınırını gösteren karar değişkenidir.



Şekil 2. Bulanık amaç fonksiyonu için üyelik fonksiyonu



Şekil 3. Bulanık kısıtlar için üyelik fonksiyonu

Böylece, Eş. 4-6 ile verilen matematiksel model Eş. 9-12 olarak yeniden düzenlenir.

$$\text{Enb } \lambda \quad (9)$$

$$\mu_0(x) \geq \lambda \quad (10)$$

$$\mu_i(x) \geq \lambda, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$\lambda \in [0,1] \quad (12)$$

burada  $\lambda$  üyelik derecelerinin alt sınırını gösteren karar değişkenidir. Yukarıdaki matematiksel model çözülerek farklı sınır değerleri için farklı proje tamamlanma süreleri hesaplanarak daha ayrıntılı çözümler elde edilmektedir.

#### 4. Önerilen yöntemin bir yazılım projesinde uygulanması

Projelerin büyüklüğünün, kapsamının ve kaynaklarının birbirinden farklı olması nedeni ile proje faaliyet süreleri tahmin edilirken belirsizlik etkisinin hesaplamalara katılması başarılı proje çizelgeleme için önemli bir adım oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında bir yazılım projesi için önerilen yöntem uygulanmış ve belirsizlikler ele alınmıştır.

Seçilen proje Sürüm-1 ve Sürüm-2 olmak üzere iki aşamadan ve toplam yirmi altı faaliyetten oluşan bir yazılım geliştirme projesidir. Proje faaliyetlerinin kapsamı Tablo 1'de tanımlanmıştır. Sürüm-1 ve Sürüm-2 benzer faaliyetleri içerdikleri için tabloda tüm faaliyetler yer almamaktadır. Faaliyetler jenerik olarak tanımlanmıştır.

**Tablo 1.** Proje faaliyetleri ve kapsamı

Faaliyet	Faaliyet Kapsamı
Proje Başlangıç Toplantısı	Tüm proje paydaşlarının katılımı ile proje planlarının, sonraki faaliyetlerin vb. konuların görüşüldüğü bir toplantıdır.
Yazılım Gereksinim Analizi ve Mimari Tasarımı	Yazılım geliştirme ekibinin teknik şartname kapsamında yazılım gereksinimlerini analiz etmesi ve yazılımın mimari tasarımının hazırlanması sürecidir. Bu faaliyet projenin temelini oluşturması nedeni ile oldukça önemli bir çalışmadır.
Yazılım Gereksinim ve Mimari Tasarım Toplantısı	Yazılım geliştirme ekibinin yapmış olduğu çalışmaların gözden geçirilip, onaylandığı ve yazılım tasarımı için dayanak noktasının oluşturulduğu bir faaliyettir.
Yazılım Geliştirme Çalışmaları	Yazılım ekibinin kodlama çalışmaları faaliyetleridir.
Yazılım Gereksinim Tanımları Dokümanı Hazırlanması	Yazılım kodlama çalışmaları ile her bir gereksinime ait tanımın dokümanite edilmesi faaliyetleridir. (Sürüm-1 ve Sürüm-2 de yer almaktadır.)
Yazılım Test Tanımları Dokümanı Hazırlanması	Yazılım kodlama çalışmaları ile doğrulama faaliyetlerini yürütebilmek için test tanımlarının hazırlanması faaliyetleridir.
Ön Kabul Testleri	Kodlama ve dokümantasyon sürecinin tamamlanmasından sonra ürünün tanımlanan gereksinimlere uygun olup olmadığını değerlendirmek için yapılan test faaliyetleridir. (Müşteri ile birlikte test edilmeden önce olduğu için ön kabul testleri olarak tanımlanmıştır.)
Nihai Kabul Testleri	Ön kabul testlerinin tamamlanmasının ardından müşteri ile gerçekleştirilen kabul testi faaliyetleridir.
Kabul Toplantısı	Nihai kabul testlerinin tamamlanmasının ardından tüm proje paydaşlarının katılımı ile gerçekleştirilen test sonuçlarının ve bundan sonraki faaliyetlerin görüşüldüğü toplantı faaliyetidir.
Kullanıcı Eğitimi	İlgili sürümün kabul faaliyeti tamamlandıktan sonra nihai kullanıcılara yazılımın kullanımına ilişkin verilen eğitim faaliyetleridir.
Müşteri Kullanım Testleri	Eğitimlerini alan kullanıcılar yazılımı test ederken, düzeltme ve iyileştirmeler kapsamında bulgularını bildirdiği faaliyet ve süreçtir
Düzeltilme ve İyileştirme Çalışmaları	Kullanıcılardan gelen düzeltme ve iyileştirme bulguları analiz edilir, uygulanabilir olanlar yazılım geliştirme ekipleri tarafından ürüne eklenmesi ve gerekli dokümanların güncellenmesi faaliyetleridir.
Sistem Entegrasyon	Kullanıcılardan gelen düzeltme ve iyileştirme bulguları tamamlandıktan sonra geliştirilen yazılımın nihai versiyonu ana sisteme entegre edilmesi faaliyetidir.
Sistem Ön Kabul Testleri	Sistem entegrasyonu tamamlandıktan sonra yazılımın sistem ile gereksinimlere uygun bir şekilde çalıştığının müşteri nihai kabul testlerinden önce doğrulandığı test faaliyetleridir.
Sistem Nihai Kabul Testleri	Sistem entegrasyon testlerinin müşteri ile doğrulanması faaliyetidir.
Nihai Kabul Toplantısı	Tüm proje paydaşlarının katılımı ile ürün kabulünün gerçekleştiği nihai kabul toplantısı faaliyetidir.
Kullanıcı Eğitimi	Son kullanıcıya sisteme entegre edilmiş ürün üzerinde kullanıcı eğitimlerinin verilmesi faaliyetidir.

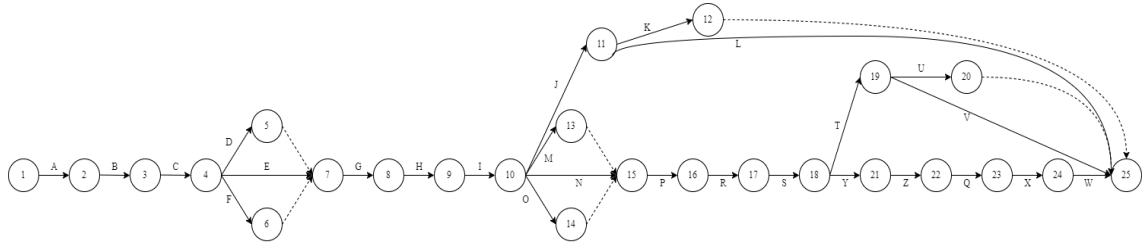
Önerilen yöntemin uygulama adımları aşağıda verildiği gibidir:

**Adım 1:** Örnek bir proje için proje faaliyetleri, öncelik ilişkileri ve her bir faaliyetin bulanık (kesin olmayan) süreleri belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Proje faaliyetleri

Numara	Faaliyet	Faaliyet Kodu	Öncelik İlişkileri	Süre (Gün)
1	Proje Başlangıç Toplantısı	A	-	1̄
2	Yazılım Gereksinim Analizi ve Mimari Tasarımı	B	A	4̄0
3	Yazılım Gereksinim ve Mimari Tasarım Toplantısı	C	B	5̄
4	Sürüm-1 Yazılım Geliştirme Çalışmaları	D	C	12̄0
5	Sürüm-1 Yazılım Gereksinim Tanımları Dokümanı Hazırlanması	E	C	4̄5
6	Sürüm-1 Yazılım Test Tanımları Dokümanı Hazırlanması	F	C	4̄5
7	Sürüm-1 Ön Kabul Testleri	G	D,E,F	1̄0
8	Sürüm-1 Nihai Kabul Testleri	H	G	5̄
9	Sürüm-1 Kabul Toplantısı	I	H	1̄
10	Sürüm-1 Kullanıcı Eğitimi	J	I	2̄
11	Sürüm-1 Müşteri Kullanım Testleri	K	J	3̄0
12	Sürüm-1 Düzeltme ve İyileştirme Çalışmaları	L	J	4̄5
13	Sürüm-2 Yazılım Geliştirme Çalışmaları	M	I	12̄0
14	Sürüm-2 Yazılım Gereksinim Tanımları Dokümanı Hazırlanması	N	I	4̄5
15	Sürüm-2 Yazılım Test Tanımları Dokümanı Hazırlanması	O	I	4̄5
16	Sürüm-2 Ön Kabul Testleri	P	M,N,O	1̄0
17	Sürüm-2 Nihai Kabul Testleri	R	P	5̄
18	Sürüm-2 Kabul Toplantısı	S	R	1̄
19	Sürüm-2 Kullanıcı Eğitimi	T	S	2̄
20	Sürüm-2 Müşteri Kullanım Testleri	U	T	3̄0
21	Sürüm-2 Düzeltme ve İyileştirme Çalışmaları	V	T	4̄5
22	Sistem Entegrasyon	Y	S	2̄0
23	Sistem Ön Kabul Testleri	Z	Y	1̄0
24	Sistem Nihai Kabul Testleri	Q	Z	1̄0
25	Nihai Kabul Toplantısı	X	Q	1̄
26	Kullanıcı Eğitimi	W	X	4̄

**Adım 2:** Tablo 1’ de tanımlanan proje faaliyetleri ve öncüllük ilişkilerine göre proje ağ diyagramı oluşturulmuş ve Şekil 4’te verilmiştir.



**Şekil 4.** Proje ağ diyagramı

**Adım 3:** Zimmerman yaklaşımı ile bulanık matematiksel modeli oluşturabilmek için amaç fonksiyonu ve her bir kısıt için  $b_0$  ve  $b_i$ ’ lere ait tolerans değerleri belirlenir. Tablo 3’te her bir faaliyet için  $p_i$  tolerans değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Bağlantı numaraları ve  $p_i$  tolerans değerleri

Bağlantılar	Faaliyet Kodu	Süre (Gün)	$p_i$ (tolerans) (Gün)
Bağlantı (1,2)	A	1	0,5
Bağlantı (2,3)	B	40	5
Bağlantı (3,4)	C	5	1,5
Bağlantı (4,5)	D	120	10
Bağlantı (4,7)	E	45	5
Bağlantı (4,6)	F	45	5
Bağlantı (7,8)	G	10	2
Bağlantı (8,9)	H	5	1,5
Bağlantı (9,10)	I	1	0,5
Bağlantı (10,11)	J	2	0,5
Bağlantı (11,12)	K	30	4
Bağlantı (11,25)	L	45	5
Bağlantı (10,13)	M	120	10
Bağlantı (10,15)	N	45	5
Bağlantı (3,4)	O	45	5
Bağlantı (15,16)	P	10	2
Bağlantı (16,17)	R	5	1,5
Bağlantı (17,18)	S	1	0,5
Bağlantı (18,19)	T	2	0,5
Bağlantı (19,20)	U	30	4
Bağlantı (19,25)	V	45	5
Bağlantı (18,21)	Y	20	4
Bağlantı (21,22)	Z	10	2
Bağlantı (22,23)	Q	10	2
Bağlantı (23,24)	X	1	0,5
Bağlantı (24,25)	W	4	0,5

**Adım 4:** Eş.(7-8) ile verilen üyelik fonksiyonları tanımlarına göre matematiksel model oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu tolerans değeri  $p_0 = 20$  olarak belirlenmiştir. Amaç fonksiyonu ve örnek bir kısıt fonksiyonu için üyelik fonksiyonları sırasıyla Eş. (13) ve Eş. (14)'de tanımlanmıştır. Eş.(11)' de verilen tüm  $\mu_i(x)$ ;  $i = 1, \dots, 26$  üyelik fonksiyonları Tablo 3 ile verilen tolerans değerleri ( $p_i$ ) yardımıyla oluşturulmuş ve modele eklenmiştir.

$$\mu_0(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer, } x_{25} - x_1 < 365 \\ 1 - \frac{(x_{25}-x_1)-365}{20} & \text{eğer, } 365 \leq x_{25} - x_1 \leq 385 \\ 1 & \text{eğer, } x_{25} - x_1 > 385 \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer, } x_2 - x_1 < 0,5 \\ 1 - \frac{1-(x_2-x_1)}{0,5} & \text{eğer, } 0,5 \leq x_2 - x_1 \leq 1 \\ 1 & \text{eğer, } x_2 - x_1 > 1 \end{cases} \quad (14)$$

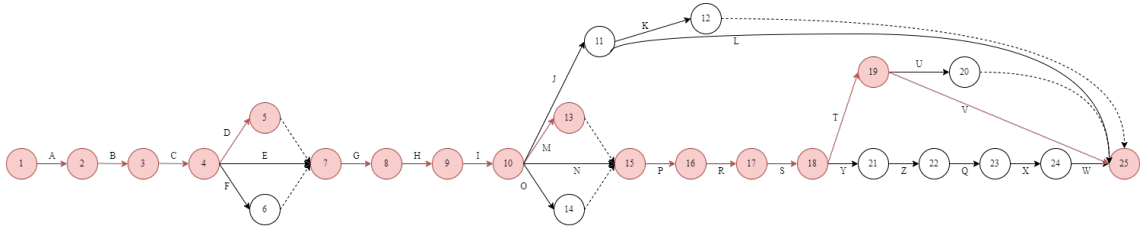
**Adım 5:** Önerilen yöntem ile oluşturulan matematiksel model IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 20.1.0 ile çözülmüştür. Eş. (7) ile verilen üyelik fonksiyonunda  $b_0$  değeri değiştirilerek  $\lambda$  değerleri bulunmuş ve buna göre proje tamamlanma süreleri hesaplanarak Tablo 4 ile verilmiştir.

**Tablo 4.** Bulanık CPM doğrusal programlama sonuçları

$1 - \frac{cx - b_0}{p_0} \geq \lambda$	$\lambda$	Proje Tamamlanma süresi (z)	$1 - \frac{cx - b_0}{p_0} \geq \lambda$	$\lambda$	Proje Tamamlanma süresi (z)
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -385$	1,000	365,000	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -369$	0,736	354,289
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -384$	0,983	364,331	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -368$	0,719	353,620
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -383$	0,967	363,661	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -367$	0,702	352,950
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -382$	0,950	362,992	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -366$	0,686	352,281
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -381$	0,934	362,322	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -365$	0,669	351,612
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -380$	0,917	361,653	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -364$	0,653	350,942
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -379$	0,901	360,984	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -363$	0,636	350,273
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -378$	0,884	360,314	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -362$	0,620	349,603
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -377$	0,868	359,645	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -361$	0,603	348,934
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -376$	0,851	358,975	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -360$	0,587	348,265
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -375$	0,835	358,306	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -359$	0,570	347,595
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -374$	0,818	357,636	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -358$	0,554	346,926
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -373$	0,802	356,967	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -357$	0,537	346,256
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -372$	0,785	356,298	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -356$	0,521	345,587
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -371$	0,769	355,628	$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -355$	0,504	344,917
$x_1 - x_{25} - 20 * \lambda \geq -370$	0,752	354,986			

**Adım 6:** Tüm  $\lambda$  değerleri için, kritik yol ve kritik faaliyetler aşağıda verildiği gibidir ve proje tamamlanma süreleri her  $\lambda$  değerinde farklı sonuçlar vermektedir. Kritik faaliyetler Şekil 5'te ağ diyagramı üzerinde gösterilmiştir.

- Kritik Yol: 1-2-3-4-5-7-8-9-10-13-15-16-17-18-19-25
- Kritik Faaliyetler: A-B-C-D-G-H-I-M-P-R-S-T-V
- Proje Tamamlanma Süresi: Tablo 4'teki z değerleri.



**Şekil 5.** Proje ağ diyagramı üzerinde kritik faaliyetlerin gösterilmesi

Yazılım geliştirme süreçleri ele alınan projenin başarısı, devamlılığı ve maliyetleri açısından oldukça önemlidir. Bir yazılım projesi sadece kodlamadan ibaret değildir. Bu sürecin başarısı projede yer alan adımların doğru yönetilmesi ve takip edilmesi, proje ekibinin sistemli çalışmasına bağlıdır. Bu çalışmada ele alınan yazılım projesinde, yazılım geliştirme sürecinde ilk aşamayı oluşturan yazılım projesinin temellerinin atıldığı tasarım toplantısı, gerekli dokümanların hazırlanması aşamaları kritik faaliyet olarak belirlenmiştir. Bu faaliyetler projenin temelini oluşturması nedeni ile oldukça önemlidir. Bunun yanında testler, kullanıcı eğitimleri ve toplantıları da yine kritik faaliyet olarak belirlenmiştir. Bu aşamalar ise müşteri ile olan görüşmelerin yapıldığı, fikirlerinin alındığı, tüm proje paydaşlarının katılımı ile gerçekleştirilen test sonuçlarının ve bundan sonraki faaliyetlerin görüşüldüğü toplantı faaliyetleridir. Projelerin başarıya ulaşmasında önemli adımlar olarak ortaya çıkan bu kritik faaliyetler sayesinde firmalar altyapısı sağlam temellere oturmuş başarılı süreçler oluşturabilirler.

## 5. Sonuçların karşılaştırılması

Belirsizlik içeren ve tam olarak değerleri bilinmeyen parametreler gerçek hayat problemlerinde sıklıkla karşılaşılan büyük bir sorundur. Belirsizlik bulanıklık ve rasgelelik olmak üzere farklı iki kavram olarak karşımıza çıkar. Rasgelelikten kaynaklanan belirsizlik modellemelerinde parametrenin sahip olduğu dağılımın biliniyor olması gerekir. Rasgele parametreye sahip modellemeler Beta dağılımına sahip olması varsayımı altında çalışılarak PERT tekniği uygulanabilir. Bu da tam olarak parametrenin sahip olduğu dağılımı yansıtmayabilir. Bu sebeple dağılım hakkında yeterli bilgi olmadığı durumda bulanık mantığın kullanılması daha uygun bir çözüm olacaktır. Bu çalışmada bulanık mantık tekniği kapsamı altında belirsiz olan tamamlanma zamanlarının üyelik fonksiyonları elde edilerek bulanık doğrusal programlama modeli oluşturulmuş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar literatürde sıklıkla karşılaşılan yöntemlerden biri olan PERT ile karşılaştırılması yapılmıştır.

PERT için proje faaliyet sürelerinin iyimser, olabilir ve kötümser süreleri bulanık modelde kullanılan aynı tolerans değerleri referans alınarak belirlenmiş, bu sürelerle ilişkin beklenen faaliyet süresi ve varyans değerleri hesaplanmış ve Tablo 5 ile verilmiştir.



Tablo 5. PERT için veriler

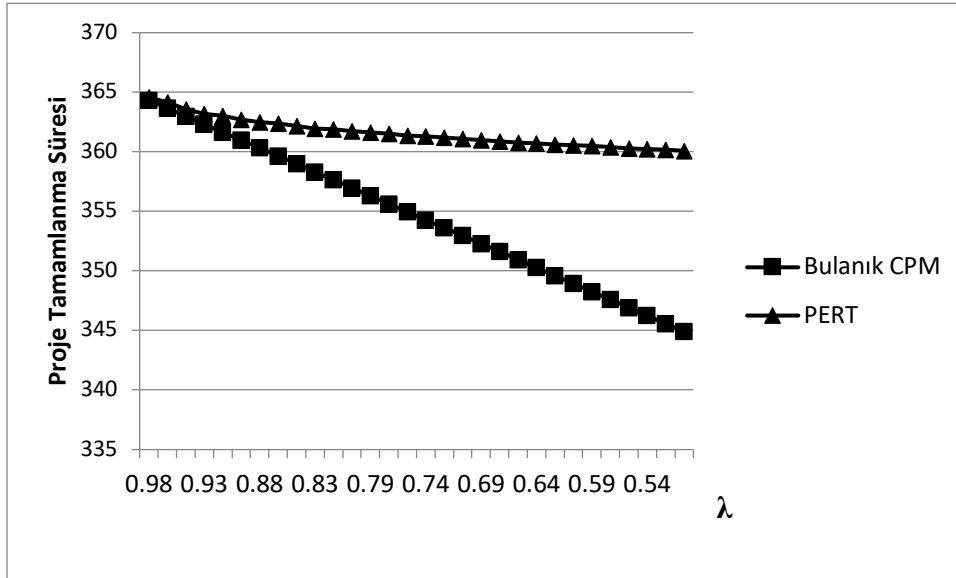
Faaliyet	Süre Tahminleri (Gün)			Tamamlanma Süresinin Beklenen Değeri	Varyans
	İyimser Süre (a)	Olabilir Süre (m)	Kötümser Süre (b)	$\frac{(a+4m+b)}{6}$	$\frac{(b-a)^2}{36}$
Proje Başlangıç Toplantısı	0,5	1	1	0,917	0,007
Yazılım Gereksinim Analizi ve Mimari Tasarımı	35	40	40	39,167	0,694
Yazılım Gereksinim ve Mimari Tasarım Toplantısı	3,5	5	5	4,750	0,063
Sürüm-1 Yazılım Geliştirme Çalışmaları	110	120	120	118,333	2,778
Sürüm-1 Yazılım Gereksinim Tanımları Dokümanı Hazırlanması	40	45	45	44,167	0,694
Sürüm-1 Yazılım Test Tanımları Dokümanı Hazırlanması	40	45	45	44,167	0,694
Sürüm-1 Ön Kabul Testleri	8	10	10	9,667	0,111
Sürüm-1 Nihai Kabul Testleri	3,5	5	5	4,750	0,063
Sürüm-1 Kabul Toplantısı	0,5	1	1	0,917	0,007
Sürüm-1 Kullanıcı Eğitimi	1,5	2	2	1,917	0,007
Sürüm-1 Müşteri Kullanım Testleri	26	30	30	29,333	0,444
Sürüm-1 Düzeltme ve İyileştirme Çalışmaları	40	45	45	44,167	0,694
Sürüm-2 Yazılım Geliştirme Çalışmaları	110	120	120	118,333	2,778
Sürüm-2 Yazılım Gereksinim Tanımları Dokümanı Hazırlanması	40	45	45	44,167	0,694
Sürüm-2 Yazılım Test Tanımları Dokümanı Hazırlanması	40	45	45	44,167	0,694
Sürüm-2 Ön Kabul Testleri	8	10	10	9,667	0,111
Sürüm-2 Nihai Kabul Testleri	3,5	5	5	4,750	0,063
Sürüm-2 Kabul Toplantısı	0,5	1	1	0,917	0,007
Sürüm-2 Kullanıcı Eğitimi	1,5	2	2	1,917	0,007
Sürüm-2 Müşteri Kullanım Testleri	26	30	30	29,333	0,444
Sürüm-2 Düzeltme ve İyileştirme Çalışmaları	40	45	45	44,167	0,694
Sistem Entegrasyon	16	20	20	19,333	0,444
Sistem Ön Kabul Testleri	8	10	10	9,667	0,111
Sistem Nihai Kabul Testleri	8	10	10	9,667	0,111
Nihai Kabul Toplantısı	0,5	1	1	0,917	0,007
Kullanıcı Eğitimi	3,5	4	4	3,917	0,007

Beklenen proje tamamlanma sürelerinin, farklı güven düzeylerine [0,99-0,50] ait sonuçları hesaplanmış ve Tablo 6 ile verilmiştir.

**Tablo 6.** Güven düzeyleri ve beklenen proje tamamlanma süresi

Güven Düzeyi (1- $\alpha$ )	$z_{\alpha/2}$	Beklenen Proje Tamamlanma Süresi (gün)	Güven Düzeyi (1- $\alpha$ )	$z_{\alpha/2}$	Beklenen Proje Tamamlanma Süresi (gün)
0,99	2,576	365,249	0,74	1,126	361,310
0,98	2,326	364,571	0,73	1,103	361,247
0,97	2,170	364,146	0,72	1,080	361,185
0,96	2,054	363,830	0,71	1,058	361,125
0,95	1,960	363,575	0,7	1,036	361,066
0,94	1,881	363,360	0,69	1,015	361,008
0,93	1,812	363,173	0,68	0,994	360,952
0,92	1,751	363,007	0,67	0,974	360,897
0,91	1,695	362,856	0,66	0,954	360,842
0,9	1,645	362,719	0,65	0,935	360,789
0,89	1,598	362,592	0,64	0,915	360,737
0,88	1,555	362,474	0,63	0,896	360,686
0,87	1,514	362,364	0,62	0,878	360,635
0,86	1,476	362,260	0,61	0,860	360,586
0,85	1,440	362,161	0,6	0,842	360,537
0,84	1,405	362,068	0,59	0,824	360,489
0,83	1,372	361,978	0,58	0,806	360,441
0,82	1,341	361,893	0,57	0,789	360,394
0,81	1,311	361,811	0,56	0,772	360,348
0,8	1,282	361,732	0,55	0,755	360,302
0,79	1,254	361,656	0,54	0,739	360,257
0,78	1,227	361,582	0,53	0,722	360,213
0,77	1,200	361,511	0,52	0,706	360,169
0,76	1,175	361,442	0,51	0,690	360,126
0,75	1,150	361,375	0,5	0,674	360,083
0,74	1,126	361,310			

Tablo 4 ile verilen bulanık doğrusal programlama ile elde edilen proje tamamlanma süreleri incelendiğinde farklı  $\lambda$  değerleri için en yüksek 365,000 ve en düşük 344,917 gün olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar PERT ile karşılaştırılmış ve farklı güven düzeylerinde bulanık doğrusal programlama ile elde edilen değerlerden daha yüksek proje tamamlanma sürelerinin bulunduğu gözlenmiştir ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Proje tamamlanma sürelerine göre yöntemlerin karşılaştırılması

## 6. Sonuçlar

Proje yönetimi faaliyetlerinde üstünlük sağlamak isteyen firmalar, proje yönetimi başarısını, projede dar boğaz olarak tanımlanabilecek kritik faaliyetlerin planlama aşamasında belirmesiyle arttırabilirler. CPM ve PERT, bilişim teknolojileri, üretim, inşaat vb. alanlarda oldukça yaygın kullanılan planlama ve çizelgeleme tekniklerinden ikisidir. Birçok problemin çözümünde uygulanabilirler ve büyük ölçekli projelerin programlanmasında kullanılabilirler. Ancak gerçek hayat problemlerinde sıkça karşılaşılan belirsizlik durumlarında bu teknikler yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizlikleri ortadan kaldıracı kavramlardan biri olan bulanık mantık, kesin rakamlar yerine belirsizliği ifade etmek için kullanıldığından, gerçek dünya projelerinde daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için uygundur. Bulanık CPM, karmaşık projelerde belirsizlikleri ve riskleri daha iyi yönetmek ve zaman çizelgesini daha doğru bir şekilde tahmin etmekte olup, bu yetersizlikleri ortadan kaldırmak için tercih edilebilir.

CPM ve PERT gibi projenin tamamlanma zamanının belirlenmesinde kullanılan klasik yöntemler, belirsizlik olması durumunda performanslarındaki zayıflıklar ve yetersizliklerinden dolayı tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Bulanık mantığın kullanılması, zaman tahmini için deneyimli kişilerden yardım alınması bu tür problemlerle başa çıkmanın temel yollarından biridir. Tüm bu durumlar değerlendirildiğinde, bu çalışma, belirsizliklerin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisini azaltmak için projenin tamamlanma zamanını belirlemek amacıyla bulanık tabanlı matematiksel model içeren bir yöntem sağlamaktadır. Önerilen yöntemde projede yer alan faaliyetlerin süreleri belirsizdir ve bu belirsizliğin matematiksel modelde değerlendirilmesi için Zimmermann'ın önerdiği bulanık doğrusal programlama yaklaşımı kullanılarak, yöntemin kritik yol analizine uyarlanması ile gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık ve doğrusal programlamanın birleşimiyle ortaya çıkan bu yöntem, karmaşık ve belirsizliğe sahip optimizasyon problemlerini ele almayı amaçlar. Bu yaklaşımın temel amacı, kesin rakamlar yerine belirsizliği ve kesin olmayan bilgileri içeren parametreleri kullanarak problemleri çözmektir. Önerilen yöntemin uygulanması ve performansının değerlendirilmesi için, bir yazılım firmasında yer alan proje için uygulama gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu yöntem ile proje çizelgelemede gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmiştir ve belirsizliklerin sonuçlar üzerindeki etkisi büyük ölçüde azaltılmıştır. Belirsizlikleri ve beklenmedik durumları hesaba katarak, daha esnek bir zaman çizelgesi oluşturulmuş ve projeyi daha iyi yönetebilme olanağı doğmuştur. Proje riskleri daha iyi analiz edilmiş ve risklerin yönetilmesi sağlanmıştır. Hangi aktivitelerin belirsiz olduğunu ve ne tür riskler taşıdığını daha iyi anlama imkanı sağlar ve önceden tedbirler alınabilir. Kaynakları daha iyi tahsis etmek için belirsizlikleri hesaba katarak, kaynakların daha verimli kullanılmasına yardımcı olur. Firma bu sayede daha hızlı tepki verme yeteneği kazanabilir ve daha başarılı projeler sunabilir. Bu sayede, iş planlamasını daha gerçekçi hale getirebilir. Ayrıca önerilen yöntemin kullanım kolaylığı ve hesaplamaların basitliği, faaliyetlerin zamanlarının deneyimli kişilerin görüşleri alınarak yaklaşık değerlerinin modele yansıtılması ile avantajlı olduğu da açıkça görülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, bulanık mantığın uzantılarından olan sezgisel, polihedron, kararsız, nötrosofik bulanık CPM modelleri uygulanabilir. Ayrıca farklı üyelik fonksiyonları kullanılarak modellemeler yapılabilir. Çalışma kapsamında kullanılan yöntem farklı alanlardaki projelere uygulanarak tartışılabilir. Bu çalışmada belirsizlikler bulanık mantık ile giderilmiş olup belirsizliğin türüne bağlı olarak stokastik modellerden de yararlanılabilir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Vildan Çorumlu, literatür taraması, problemin ortaya konması, çözümün uygulanması ve makalenin oluşturulması konusunda, Kumru Didem Atalay ve Esra Dinler çözüm yönteminin önerilmesi, kavramsal çerçevenin oluşturulması, uygulama kısmının geliştirilmesi ve makalenin düzenlenmesi konusunda katkıda bulunmuştur.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Ammar, M. A., ve Abd-ElKhalek, S. I. (2022). Criticality measurement in fuzzy project scheduling. *International Journal of Construction Management*, 22(2), 252-261. <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1619226>

Atlı Ö. ve Kahraman C. (2013). Bulanık Kritik Yol Analizi. *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, Sigma (31), 128-140.

Başar, A. (2022). Yeni bir matematiksel model ve hibrit meta sezgisel ile kaynak kısıtlı projelerin çizelgelenmesi: Bir vaka çalışması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37(3), 1169-1184. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.913666>

Castro-Lacouture, D., Süer, G. A., Gonzalez-Joaqui, J., ve Yates, J. K. (2009). Construction project scheduling with time, cost, and material restrictions using fuzzy mathematical models and critical path method. *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(10), 1096-1104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:10\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(109))

Chanas, S. ve Zieliński, P. (2001). Critical path analysis in the network with fuzzy activity times. *Fuzzy sets and systems*, 122(2), 195-204. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00076-2)

Chen, S. P., ve Hsueh, Y. J. (2008). A simple approach to fuzzy critical path analysis in project networks. *Applied Mathematical Modelling*, 32(7), 1289-1297. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.04.009>

Chwastyk, A. ve Pisz, I. (2020). Critical path analysis with imprecise activities times. *Sustainable Economic Development and Application of Innovation Management*, 2004-2013. <https://repo.uni.opole.pl/info/article/UO6a9b4e31347445de85d73b03ece7ce3c/>

Durucasu, H., İcan, Ö., Karamaşa, Ç., Yeşilaydın, G., ve Gülcan, B. (2015). Bulanık CPM Yöntemiyle Proje Çizelgeleme: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama. *Ege Akademik Bakış*, 15 (4), 449-466. <http://www.trdizin.gov.tr/publication/paper/detail/TVRrMU16SXhNUT09>

Elkalla, I., Elbeltagi, E., ve El Shikh, M. (2021). Solving fuzzy time–cost trade-off in construction projects using linear programming. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(1), 267-278. <https://doi.org/10.1007/s40030-020-00489-7>

- Habibi, F., Birgani, O., Koppelaar, H. ve Radenović, S. (2018). Using fuzzy logic to improve the project time and cost estimation based on Project Evaluation and Review Technique (PERT). *Journal of Project Management*, 3(4), 183-196. <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2018.4.002>
- Han, T. C., Chung, C. C., ve Liang, G. S. (2006). Application of fuzzy critical path method to airports cargo ground operation systems. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(3), 2. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2067>
- Herroelen, W. ve Leus, R. (2005). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European journal of operational research*, 165(2), 289-306. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.002>
- ISO 21502:2020 Project, Programme and Portfolio Management – Guidance On Project Management, Switzerland: ISO, 2020.
- Jayagowri, P. ve Geetharamani, G. (2015). Using metric distance ranking method to find intuitionistic fuzzy critical path. *Journal of Applied Mathematics*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/952150>
- Kenar, E. (2021). Klasik Pert ve Bulanık Pert Yöntemleri ile Proje Yönetimi ve Bir Mermer Fabrikası Kurulumunda Uygulaması (Doktora Tezi).
- Lai, Y. J. ve Hwang, C. L. (1992). Fuzzy mathematical programming. In *Fuzzy mathematical programming* (pp. 74-186). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Li, F. ve Wei, J. (2007, September). A fuzzy approach for the project management. In *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (pp. 5180-5183). IEEE.
- Liang, T. F., Huang, T. S., ve Yang, M. F. (2012). Application of fuzzy mathematical programming to imprecise project management decisions. *Quality & Quantity*, 46(5), 1451-1470. <https://doi.org/10.1007/s11135-011-9460-y>
- Madhuri, K. U., Saradhi, B. P. ve Shankar, N. R. (2013). Fuzzy linear programming model for critical path analysis. *Int. J. Contemp. Math. Sciences*, 8(2), 93-116. <https://doi.org/10.12988/ijcms.2013.13010>
- Mazlum, M., ve Güneri, A. F. (2015). CPM, PERT and project management with fuzzy logic technique and implementation on a business. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 210, 348-357. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.378>
- Sadjadi, S. J., Pourmoayed, R. ve Aryanezhad, M. B. (2012). A robust critical path in an environment with hybrid uncertainty. *Applied Soft Computing*, 12(3), 1087-1100. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.11.015>
- Saradhi, B. P., Ramesh, H., Shankar, N. R. ve Shaik, R. (2021). Hesitant Fuzzy Project Planning and Scheduling using Critical path Technique. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(6), 5272-5286. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/hesitant-fuzzy-project-planning-scheduling-using/docview/2640416443/se-2?accountid=15426>
- Sethupathy, G., Judson L., ve Paul V.K. (2020). Time – Cost Optimization (TCO) By Application Of Fuzzy Logic In Construction Projects. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 8(6), 479-486. <https://doi.org/10.6084/m9.doi.one.IJCRT2006070>

- Shankar, N. R., Sireesha, V. ve Rao, P. P. B. (2010). An analytical method for finding critical path in a fuzzy project network. *International Journal of contemporary mathematical sciences*, 5(20), 953-962. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:14403952>
- Sireesha, V., Rao, K. S., Shankar, N. R., ve Babu, S. S. (2012). Critical path analysis in the network with fuzzy interval numbers as activity times. *intervals*, 16, 21. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(00\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(00)00076-2)
- Soysal, S., Dengiz, B., ve Atalay, K. (2021). Belirsizlik altında kaynak kısıtlı çok modlu çoklu proje çizelgeleme. *Journal of Turkish Operations Management*, 5(1), 598-614.
- Subulan, K. (2020). Çok amaçlı kurumsal kaynak planlaması uyarlama projelerinin insan kaynağı kısıtı ve belirsizlik altında çizelgelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1469-1486. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.519652>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353.
- Zimmermann, H. J. (1983). Fuzzy mathematical programming. *Computers & operations research*, 10(4), 291-298. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(83\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0305-0548(83)90004-7)



# Journal of Turkish Operations Management

## Denetimli makine öğrenme algoritmalarıyla iş kazası ve meslek hastalıklarının önlenmesi: Farklı sektör uygulamaları

<sup>1</sup>Adnan Karabulut, <sup>2</sup>Mehmet Baran, <sup>3</sup>Ergün Eraslan

<sup>1</sup> Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Doktora Öğrencisi, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Ankara, Türkiye  
e-mail: adnan.karabulut@hotmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-0643-098X>

<sup>2</sup> İnşaat Müh., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye  
e-mail: mehmet.baran@ybu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6674-7308>

<sup>3</sup> Endüstri Müh., Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye  
e-mail: eraslan@ybu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5667-0391>

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 15.03.2023  
Revize: 02.10.2023  
Kabul: 21.11.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Algoritma,  
İş Kazası,  
Meslek Hastalığı

### Özet

İş sağlığı ve güvenliği, proaktif bir yöntemle iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önleyen bir disiplindir. Çalışan sağlığı için, ülkelerin uluslararası sözleşmelerde ve işverenlerin ulusal mevzuatta sorumlulukları bulunmaktadır. İşverenlerce risk değerlendirmesinin yapılması, iş güvenliği eğitimlerinin verilmesi, denetimlerin gerçekleştirilmesi, iş güvenliği uzmanı ve işyeri hekimi çalıştırılması ve ilgili tüm çalışmaların kayıt altına alınması zorunludur. Ülkelerde iş müfettişleri ile denetimler yapılmakta ve özel şirketler iş güvenliği hizmeti vermektedir. Ancak, işçi, malzeme, iş ekipmanı akışının çok hızlı ve fazla olduğu petrokimya, rafineri gibi büyük sanayi tesislerinde yetkililerin iş güvenliğini izlemesi zorlaşmaktadır. İşyeri kapasitesi, çalışan sayısı ve malzeme akışı arttıkça iş kazaları ve meslek hastalıklarının türü ve sayısı da artmaktadır. Yapay zekâ teknolojileri bu takipleri kolaylaştırmaktadır. Bu makalenin amacı, iş kazaları ve meslek hastalıklarına neden olan etkenlerin proaktif şekilde denetimli makine öğrenme algoritmalarıyla önlenmesinin farklı sektörlerde araştırılmasıdır. Scencedirect, scopus, googlescholar veri tabanları üzerinde literatür taraması yapılmış, sektörlerde kullanılan algoritmalar incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalar ve farklı sektörlerdeki uygulamalara göre sensörlerle toplanıp bulut bilişimle saklanan veriler, daha önceden eğitilmiş ilgili denetimli makine öğrenmesi algoritmalarına beslenerek iş kazaları ve meslek hastalıklarına neden olan faktörler önceden belirlenebilmekte ve risk değerlendirme analizleri için tahminler yapılabilmektedir. Ses, metin ve görüntü verilerinin yanı sıra sağlık, konum, ortam, mesafe, seviye ve basınç gibi fiziksel parametreler de sensörlerle anlık takip edilebilmektedir. Aşılan fiziksel eşik değerlerde, tehlikeli bir durum veya davranış tespitinde yöneticiler uyarılmaktadır. Çalışan ve araç konum takibinin yanı sıra üretim, bakım ve lojistik iş araçlarının performansı da izlenerek öngörücü bakım sağlanabilmektedir. Azalan iş kazası ve meslek hastalıklarıyla, iş güvenliği performansı artmakta ve sonuç olarak maliyetler azalmaktadır.

# Prevention of occupational accidents and occupational diseases with supervised machine learning algorithms: Different sector applications

## Article Info

### Article History:

Received: 15.03.2023  
Revised: 02.10.2023  
Accepted: 21.11.2023

### Keywords:

Algorithm,  
Work Accident,  
Occupational Disease

## Abstract

Occupational health and safety is a discipline that prevents work accidents and occupational diseases with a proactive method. Countries have responsibilities for employee health in international agreements and employers in national legislation. It is mandatory for employers to carry out risk assessments, provide occupational safety training, carry out inspections, employ occupational safety experts and workplace physicians, and record all relevant work. In countries, inspections are carried out by labor inspectors and private companies provide occupational safety services. However, it becomes difficult for authorities to monitor occupational safety in large industrial facilities such as petrochemicals and refineries, where the flow of workers, materials and work equipment is very fast and abundant. As workplace capacity, number of employees and material flow increases, the type and number of work accidents and occupational diseases also increase. Artificial intelligence technologies make these tracking easier. The aim of this article is to investigate the proactive prevention of factors that cause occupational accidents and occupational diseases in different sectors with supervised machine learning algorithms. A literature review was conducted on Scencedirect, Scopus and Google Scholar databases, and the algorithms used in the sectors were examined. According to studies in the literature and applications in different sectors, data collected with sensors and stored in cloud computing can be fed to relevant supervised machine learning algorithms that have been previously trained and tested, and the factors that cause occupational accidents and occupational diseases can be determined in advance and predictions can be made for risk assessment analyses. In addition to sound, image, health, location and environment data, physical parameters such as distance, level and pressure are monitored instantly with sensors. Managers are warned when physical threshold values are exceeded or a dangerous situation or behavior is detected. In addition to employee and vehicle location tracking, predictive maintenance can be provided by monitoring the performance of production, maintenance and logistics work vehicles. With decreasing work accidents and occupational diseases, occupational safety performance increases and, as a result, costs decrease.

## 1-Giriş

İş Kazaları (İK) ve Meslek Hastalıklarıyla (MH) ilgili ekonomik maliyet tahminleri; ülkelerin yıllık üretim değer toplamının %1,8 ila %6'sı arasında değişmekte olup, Uluslararası İş Organizasyonuna (ILO) göre ortalama %4'tür (Takala vd., 2014). Dünyada her yıl 100 milyon iş kazasında 100 bin ve 11 milyon meslek hastalığı teşhisinde 700 bin çalışanın hayatını kaybettiği tahmin edilmiştir (Leigh vd., 1999). Aradan geçen 22 yıl süre sonunda ILO verileri incelendiğinde her yıl meydana gelen 340 milyon İK ile 160 milyon MH teşhisinde toplam 2,3 milyon çalışan hayatını kaybettiği belirtilmektedir (ILO, 2023).

2011 yılında Almanya'da ortaya çıkan ve temelinde Yapay Zekâya (YZ) dayalı dijital üretim olan Endüstri 4.0 son yıllarda yaygınlaşmaya başlamış ve Endüstriyel YZ, genel YZ'dan daha önemli hale gelmiştir (Peres vd., 2020). Endüstri 4.0 paralelinde YZ temelli İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) gelişmekte olup, İSG 4.0 teknolojileriyle İK ve MH'nin önlenmesi mümkün olmaktadır. Büyük veri, nesnelere interneti, bulut bilişim, robotik sistemler, artırılmış ve sanal gerçeklik gibi YZ teknolojileri ile İSG 4.0 performansının artırılması mümkün olmaktadır (Çelik, 2019).

Denetimli Makine Öğrenimi (DMÖ) ve Denetimsiz Makine Öğrenimi (DzMÖ) ile Derin Öğrenme (DÖ) Makine Öğreniminin (MÖ) alt dallarıdır. DMÖ algoritmaları kamera ve sensörlerden alınan gerçek zamanlı verilerle beslenmektedir. DMÖ'de DzMÖ ve DÖ'nin aksine, veriler etiketlenmekte, sistem eğitilip ardından test edilmektedir. DzMÖ'de sistem etiketsiz verilerle eğitildiğinden ve örneklerin çıkışları bilinmediği için tanıma veya sınıflandırmada değil kümeleme, olasılık yoğunluk tahmini, öznitelikler arasındaki ilişkilerin bulunması ve boyut



indirgeme gibi işlemler için kullanılmakta (Bilgin, 2017) ve elde edilen sonuçlar DMÖ'de veri olarak kullanılabilir (Chao, 2011). DZMÖ'de genellikle parçalayıcı ve hiyerarşik kümeleme algoritmaları kullanılmaktadır (Özgür, 2004). Hinton ve Salakhutdinov tarafından oluşturulan (Hinton ve ark 2016) DÖ'de zamanla pek çok algoritma geliştirilmiştir (Goodfellow ve ark 2016).

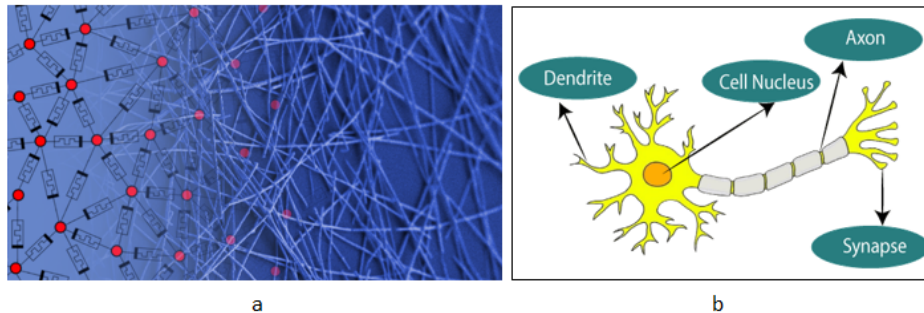
Tek katmanlı değil çok katmanlı Yapay Sinir Ağlarının (YSA) ileri düzeyli bir yaklaşımı olan DÖ'de Alexnet, Vgg16, Vgg19 ResNet50, GoogleNet gibi gelişmiş algoritmalar kullanılmaktadır (Doğan ve Türkoğlu, 2018). DÖ çalışmalarının en uç örneği sürücüsüz araçlardır. Navigasyon için GPS, çarpışmaları önlemek için sensör tasarımı ve nesnelere tespit etmek için kamera teknolojileri ile sürüş simülatörü ise DÖ'nin diğer çalışma alanlarıdır (Aki, 2020).

Literatürde, İK'ları ve MH'ına neden olan etkenlerin gerçekleşmeden MÖ teknikleri ile önceden tespiti kapsamında çalışmalar bulunmaktadır. Çalışanların konum ve sağlık bilgileri, iş araçlarının konum bilgileri, çalışma ortamı havasının termal bilgileri takip edilerek İSG'ne zarar verecek etkenler önceden tespit edilebilmektedir. Tehlikeli iş ortamlarına çalışan yerine Drone ve Lidar gibi YZ kullanan ekipmanlar görevlendirilmektedir. Yaş, eğitim, tecrübe, işbaşı ve İSG eğitimi gibi bilgiler çalışan bilgileri iken tehlikeli durum ve tehlikeli davranışlar ile çalışma havası termal bilgileri işyerine ilişkin bilgilerdir. İK'larına neden olabilecek çalışan ve işyeri bilgileri; YSA gibi MÖ tekniklerinde veri olarak kullanılarak iş kaza sayısı ve yaralı sayısı gibi İSG verileri tahmin edilebilmektedir (Özden ve Acı, 2016; Akşehir vd., 2019). DMÖ algoritmaları ile İK'na neden olabilecek baret takmama, emniyet kemeri kullanmama gibi tehlikeli davranışlar görüntü işleme ile tespit edilebilmektedir. Dolayısıyla DMÖ algoritmalarının teoride nasıl oluştuğu, eğitimi ve testi önem kazanmaktadır.

Bu makale çalışmasında İK ve MH'na neden olan etkenlerin DMÖ algoritmalarını kullanan YZ teknolojilerinin kullanılarak önceden proaktif şekilde tespit edilmesidir. Böylelikle İK ve MH'nın oluşmadan önlenmesi amaçlanmıştır. İşletmelerde kamera ve sensörlerle anlık toplanan verilerin etiketli verilerle önceden eğitilen algoritmalarda işlenmesi ile İK ve MH'na neden olabilecek etkenlerin anlık takibi sayesinde çalışan sağlığının korunmasının yanında, üretim araçlarının ve çevrenin korunması ile İK ve MH'nın önlenmesi ve İSG maliyetlerinin düşürülmesi makalenin özünü oluşturmaktadır.

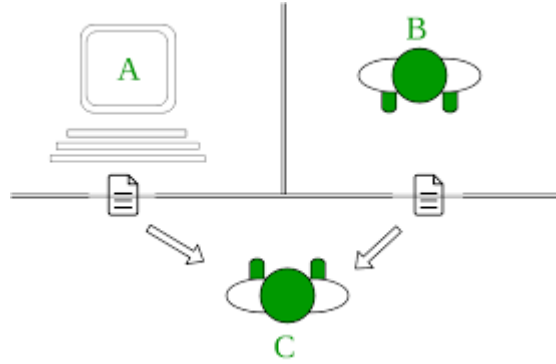
## 1.1. Denetimli Makine Öğrenmesi Algoritmaları

Sinir bilimci McCulloch ve matematikçi Pitts 1943 yılında yayınladıkları “*Sinirsel aktivite için matematiksel hesaplama*” adlı makalelerinde, bir nöronun biyolojik çalışmasını matematiksel olarak modellemişlerdir. Nöronun uçlarında bulunan dendritler dış dünyadan aldıkları giriş değerlerini ağırlıkları oranında çarpıp nöronun merkezine iletmektedir. Nöron merkezinde toplanan çarpımlar, eşik değeri aşarsa akson üzerinden sonraki nöronların uçlarına (dendritlerine) iletilmektedir. Şekil 1'de nöronlar arası karmaşık bağlantılar ve örnek bir nöronun yapısı görülmektedir. Dendritlerden giren veriler, hücre çekirdeğinde giriş kanallarının ağırlık değerleri ile çarpılarak toplanmakta ve çıkış değeri akson üzerinden diğer nöronlara iletilmektedir. 1943'te McCulloch ve Pitts'in önerdiği model, ağırlık, iletim ve hücre gövdesi hakkında hesaplamalar içermekte olup perception modeli olarak kabul edilmiştir (Wu vd., 2019).



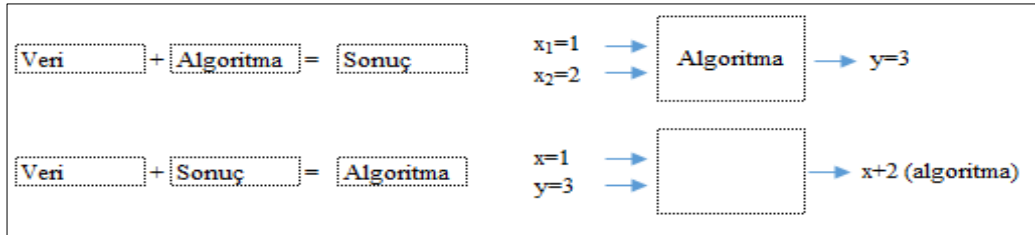
Şekil 1. McCulloch ve Pitts nöron modeli (a:Advancedsciencenews 2023, b:Javapoint 2023)

1950 yılında Alan Turing, “*Makine düşünebilir mi?*” başlıklı makalesinde, Turing testini geçen makinenin (yazılımın/robotun) insan zekâsına sahip olacağını belirtmiştir. Turing testinde, bilgisayardan yazarak soru soran bir sorgucu bulunmaktadır (Şekil 2'de C). Perdenin arkasında bulunan gerçek kişi (Şekil 2'de B) ve makine (Şekil 2'de A) sorgucunun sorularına yazarak cevap vermektedir. Sorgucu cevaplardan, hangisinin insan olduğunu belirleyemezse, makine Turing testini geçmiş kabul edilmektedir. Günümüze kadar Eugene Goostman adlı bilgisayar % 33 başarı sağlamış bulunmaktadır (Ingram, 2014).



Şekil 2. Turing testi modeli (Webtekno, 2023)

YZ terimini ilk kez 1956 yılında ABD/Dartmouth konferansında McCharty kullanmıştır. McCharty tüm nöronların algoritmalarının yazılabilmesi halinde insan zekâsı gibi karar veren bir YZ'nın 2050 yılına kadar oluşturulabileceğini belirtmiştir (Moore, 2006). 1950'li yıllarda, insan beyinde  $10^{11}$  adet nöron bulunduğu ve her nöronun onbinlerce bağlantısı sonucu beyinde oluşan milyarlarca bağlantıyı açıklayacak bir algoritmanın yazılamayacağı teorik çerçevede tartışılmıştır. Bu sorunu aşmak için 1959 yılında Arthur Samuel, bilgisayarlara her seferinde programlama yazmadan öğrenme yeteneğini kazandıran MÖ'sini bulmuştur (Alzubi vd., 2018). Şekil 3'de görüldüğü gibi klasik programlamada  $x_1$  ve  $x_2$  değerleri girilerek  $y$  bulunmaktradır. MÖ'de ise  $x$  ve  $y$  değerleri girilerek  $x+2$  değeri tespit edilmektedir. MÖ'de verilerden algoritma elde edilmektedir. Günümüzde Python, Lisp, Prolog, C++, Java gibi YZ yazılım dillerinde algoritmalar oluşturulabilmektedir. Daha gelişmiş ChatGPT gibi programlarda ise algoritmalarındaki hatalar düzeltilebilmektedir.



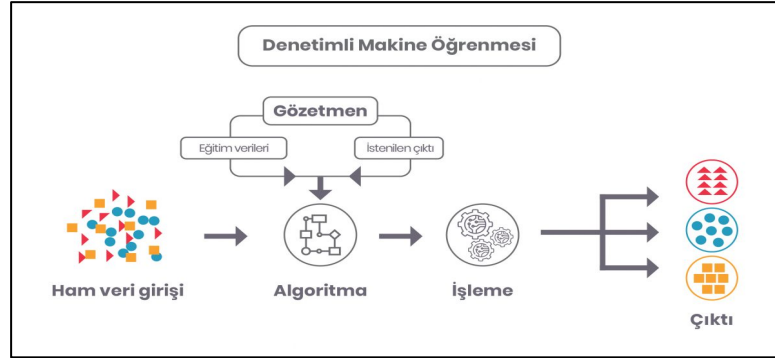
Şekil 3. Makine öğrenimsi modeli

MÖ verilerden öğrenmeyi amaçlayan bir bilgisayar bilim dalıdır (Jiang vd., 2020). MÖ'de mevcut veriler kullanılarak sınıflama, kümeleme, tahmin ve birliktelik kuralları oluşturma çalışmaları yapılmaktadır (Singh, 2016). MÖ'nin denetimli, denetimsiz, yarı denetimli ve pekiştirilmiş öğrenme gibi alt dalları bulunmaktadır. Bu çalışmanın konusu kapsamında DMÖ incelenmiştir. Literatüre göre DMÖ çalışmalarında çoğunlukla verilerin %70'i eğitim için ve %30'u test için kullanılmaktadır (Hernán vd., 2019).

## 1.2. Denetimli Makine Algoritmalarının Eğitimi ve Testi

MÖ güvenlik teorileri, tıp, bilgi teknolojisi, istatistik, olasılık, psikoloji, nörobiyoloji, finans ve mühendislik gibi birçok disiplinde kullanılmaktadır. MÖ algoritmasının görevi değişkenler arasındaki kalıpları bulmak ve ilgili matematiksel modelleri oluşturmaktır ve verimli çalışabilmesi için yeterli sayıda ve kalitede veri gerektirmektedir (Suthaharan, 2016). MÖ'de, denetimli, denetimsiz, yarı denetimli, takviye, aktarım ve öğrenmeyi öğrenme olmak üzere altı farklı eğitim metodu bulunmaktadır (Nateski, 2017). DMÖ'de etiketli verilerle sınıflama ve regresyon (tahmin) yapılırken, DzMÖ'de etiketsiz verilerle sadece gruplama (kümeleme) işlemleri yapılabilmektedir. DMÖ'de sürekli veriler için regresyon, karar ağaçları ve rasgele ormanlar gibi algoritmalar kullanılırken, kategorik veriler için en yakın komşu, karar ağaçları, lojistik regresyon, naive bayes ve destek vektör makineleri gibi sınıflama algoritmaları kullanılmakta olup her birinin avantaj ve dezaavantajları bulunmaktadır (Bhavsar vd., 2012). MÖ algoritması eldeki veri matrisinden tecrübe ile öğrenmektedir (Brynjolfsson vd., 2018). E-postalar spam veya normal posta olarak etiketlenmektedir. Etiketlenen verilere göre yeni e postalarda doğru sayıda sınıflanan e-posta sayısı MÖ'nin performansı kabul edilmektedir (Shetty vd., 2022).

MÖ istatistik ve öğrenme süreçlerini birleştirdiğinden DMÖ algoritmalarının verimli çalışabilmesi için eğitilip test edilmesi gerekmektedir (Şekil 4). Literatürde genellikle verilerin %70'i eğitim, %30'u test için kullanılmaktadır (Muhammad vd., 2021). Örneğin Corona test sonuçları belli olan 1000 adet akciğer filminin 800'ü eğitim için kullanılmış olsun. Test için kullanılan 100'ünün pozitif ve 100'ünün negatif olduğunu farz edelim. Sistem 100 pozitifin 95'ini ve 100 negatifin 90'ını doğru tespit edebiliyorsa ilgili DMÖ algoritması ortalama %92,5 doğrulukla yeni akciğer filmlerinde Corona testini doğru teşhis edecektir.



Şekil 4. Denetimli makine öğrenme modeli (Turhost, 2023)

Bir DMÖ algoritmasının ne derece sağlıklı sonuç verdiğini belirten göstergeler Şekil 5'deki karışıklık matrisinde bulunmaktadır. Örnek vermek Şekil 5'de 0 Korona testi negatif demek iken 1 Korona testi pozitif demek olsun. Gerçekte korona negative olanların tahminde negatif bulunması Doğru Negatif (TN), gerçekte korona pozitif olanların tahminde pozitif bulunması ise Doğru Pozitifdir (TP). Diğer bir benzetmeye göre TP (True positive-Doğru Pozitif) hastaya hasta demek, FP (False positive- Yanlış Pozitif) hasta olmayana hasta demek, TN (True negative-Doğru Negatif) hasta olmayana hasta değil demek ve FN (False negative-Yanlış Negatif) ise hasta olana hasta değil demek anlamına gelmektedir. Gerçekte negatif olanların tahminde pozitif bulunması Yanlış Pozitif (FP), gerçekte pozitif olanların tahminde negatif bulunması ise Yanlış Negatifdir (FN). TN ve TP değerleri ne derece fazlaysa algoritma o derece verimli sonuçlar sağlayacaktır (Choudhary vd., 2017).

		Tahmin edilen sonuç	
		0	1
Gerçek sonuç	0	TN	FP
	1	FN	TP

Şekil 5. Denetimli makine öğrenme performans kriterleri (Towardsdatascience, 2023)

Literatürde DMÖ algoritmalarının verimliliğini belirlemek için Şekil 5'de belirtilen TN, TP, FN ve FP değişkenlerini kullanan farklı formüller kullanılmaktadır. Bir DMÖ algoritmasının doğruluk (Acc) değeri (1) numaralı formülle, kesinlik değeri (2) numaralı formülle, duyarlılık değeri (3) numaralı formülle, F1 değeri (4) numaralı formülle ve özgüllük değeri (5) numaralı formülle tespit edilmektedir (Ciortuz, 2008).

$$Acc = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)} \quad (1)$$

$$P = \frac{TP}{(TP+FP)} \quad (2)$$

$$R = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (3)$$

$$F1 = \frac{2*P*R}{(P+R)} \quad (4)$$

$$Sp = \frac{TN}{(TN+FP)} \quad (5)$$

Doğruluk (Acc) değeri doğru olarak sınıflandırılan örneklerin yüzdesidir ancak tek başına yeterli değildir. Kesinlik pozitif olarak tahminlenen değerlerin kaçının gerçekte pozitif olduğudur. Duyarlılık pozitif olarak tahmin edilmesi gerekenlerin ne kadarının pozitif olarak tahmin edildiğidir. F1 skoru (4 numaralı formül) bir algoritmanın doğruluk (Acc) ölçütünün (1 numaralı formül) bir göstergesi olup kesinlik (2 numaralı formül) ve duyarlılığın (3 numaralı formül) harmonik bir ortalamasıdır. Negatifliği daha doğru bir şekilde tanımlamak önemliyse 5 numaralı

formüldeki özgüllük ölçütü kullanılır.

Covid19 tespitinde kullanılan DMÖ algoritmalarının verimliliklerinin karşılaştırıldığı bir çalışmada, ücretsiz (açık kaynak kodlu) bir YZ yazılımı olan WEKA kullanılmış ve Tablo 1’de görülen sonuçlar elde edilmiştir (Osisanwo vd., 2017).

**Tablo 1.** Denetimli makine öğrenme algoritmaları performans değerleri (Muhammad vd., 2020)

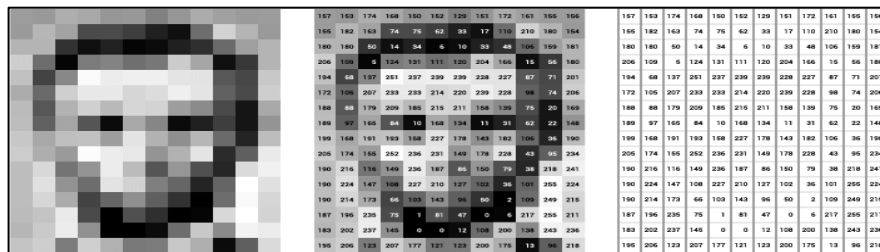
DMÖ algoritması	%Doğruluk (1 nolu formül)	%Duyarlılık (3 nolu formül)	%Özgüllük (5 nolu formül)
Karar Ağacı	94.99	89.20	93.22
Lojistik Regresyon	94.41	86.34	87.34
Navie Bayes	94.36	83.76	94.30
Destek Vektör Makineleri	92.40	93.34	76.50
Yapay Sinir Ağları	89.20	92.40	83.50

Daha güçlü MÖ algoritmaları için eğitim ve test verilerinin aynı dağılımdan alınmaması önemlidir (Bagnell, 2005) ancak literatür çalışmalarında genellikle aynı veri setinden alındığı görülmektedir. Veri sayısı ve kalitesi arttıkça MÖ algoritmalarının performansının arttığı bilinmektedir (Kaynar vd., 2016).

İSG’de İK ve MH’na neden olacak etkenlerin DMÖ ile önceden tespiti mümkündür. Kamera ve ses sensörlerden elde edilen saha verilerinin IoT üzerinden bulut bilişimde depolanarak etiketlenmesi (işaretlenmesi) sağlanmalıdır. Etiketlenen verilerle eğitilmiş DMÖ algoritmalarında örneğin kameralarla tespit edilen görüntülerden emniyet kemeri takmayan çalışan, çalışma ayakkabısının altına yerleştirilen ses sensöründen yüksekte düşen işçi tespit edilebildiği gibi DzmÖ ile kaza tutanaklarından kaza nedenleri de tespit edilebilmektedir. Bu kapsamdaki uygulamaların daha iyi anlaşılması için bilgisayar dilinde görüntü, ses, metin verilerinin nasıl işlendiği önem kazanmaktadır.

### 1.3. Denetimli Makine Algoritmalarında Ses, Metin ve Görüntü İşleme

YZ teknolojilerinde ses, metin ve görüntü işlenebilmektedir. Kaydedilen ses verileri öncelikle metne çevrilmektedir. Metin ve görüntü verileri ise doğrudan (0,1) ikili sisteme çevrilmektedir. Genel olarak bilgisayar görmesine bilgisayarlı tomografi, manyetik rezonans ve uzaktan algılama gibi iki veya üç boyutlu olanlar konu olmaktadır (Zhang ve Dahu, 2019). Görüntü tanıma (sayısallaştırma) tarama, örnekleme ve niceleme süreçlerinin toplamıdır ki görüntü dili analogdan dijitale dönüştürülmektedir. Görüntüler sisteme girildiğinde piksellere bölünerek her pikselin renk değeri hesaplanmaktadır. Farklı görüntü işleme teknikleri olmakla birlikte Şekil 6’da görüldüğü gibi hangi girilik seviyesinde kaç piksel olduğu görülmektedir. Grilik seviyesi 0 beyaz demek iken 1 ise siyah olup diğer renkler (0,1) arası değer almaktadır. Renkli resimler ve video görüntüleri de aynı teknikle tanımlanmaktadır. Görüntü ve videolarda Evrişimli Sinir Ağları (CNN) ve Konvolüsyonel Sinir Ağları (RNN) gibi gelişmiş DÖ algoritmaları da kullanılarak daha başarılı nesne tespiti yapılabilmektedir. Kamera görüntüleri ile eğitilen DMÖ algoritmaları ile emniyet kemeri takmayan çalışan, devrik bir kimyasal varil, yorgun bir sürücü kolaylıkla tespit edilebilmektedir.



**Şekil 6.** Resim işleme (V7labs, 2023)

Metin verileri doğal dil işleme teknikleriyle işlenebilmektedir. Tablo 2’de iki İş Kaza Raporu (İKR) ve iki Meslek Hastalığı Raporunda (MHR) geçen kelimelere göre İK ve MH türleri bulunmaktadır. Belge 1 sisteme taratıldığında en çok kelime benzerliği olan hepatit MH olarak tespiti edilecektir. Belge 2 sisteme taratıldığında ise İK olarak yüksekte düşmeyi tespit edilecektir. Belge 3 İK olarak patlama ve belge 4 MH olarak kuduz olarak tespit edilecektir.

Tablo 2. Metin işleme

İK R1	Düşme, kırık, ...> İK türü 1 (yüksekten düşme)								
İK R2	Kazan, patlama ...> İK türü 2 (patlama)								
MHR1	Hastane, iğne, sarılık ...> MH türü 1 (hepatit)								
MHR2	Veteriner, kedi ...> MH türü 2 (kuduz)								
Belge 1 (iğne, düşme, sarılık, kazan)									
Belge 2 (düşme, hastane, kırık)									
Belge 3 (kazan, sarılık, patlama, kedi)									
Belge 4 (veteriner, hastane, kedi, kırık)									
	düşme	kırık	kazan	patlama	hastane	iğne	sarılık	veteriner	kuduz
İK R1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
İK R2	0	0	1	1	0	0	0	0	0
MHR1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
MHR2	0	0	0	0	0	0	0	1	1

İş kaza tutanakları ile MH raporları yararlı bilgiler içermektedir. Bununla birlikte söz konusu tutanak ve raporlarda bulunan veriler yapılandırılmamış veya yarı yapılandırılmış halde bulunmaktadır ve analiz etmek uzun ve zorlu bir süreçtir. İK tutanakları ve MH raporları DÖ algoritmalarında işlenerek İK ve MH için kök nedenleri veren örüntülerin tespit edilmesi mümkün olmaktadır (Zhong vd., 2020). Çalışmanın 4. Literatür Araştırması ve Sektör Uygulamaları kısmında belirtildiği üzere İK ve MH'na neden olan etkenlerin önceden tespiti kapsamında genelde görüntü işleme teknikleri kullanılmaktadır. İK tutanakları ve MH raporlarının MÖ kapsamında inceleyen çalışmalar ise çok fazla bulunmamaktadır. Çalışmada İK tutanakları ile MH raporlarının MÖ'de işlenmesi incelenmemiş, sahadan kamera ve sensörlerle elde edilen verilerin önceden eğitilen DMÖ algoritmalarında işlenerek İK ve MH'na neden olacak etkenlerin önceden tespiti yapılmıştır.

## 2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada DMÖ algoritmaları kullanılarak ses (titreşim), görüntü ve çalışma ortamındaki termal veriler ile iş ekipmanlarındaki kritik çalışma değerleri anlık takip edilerek İK ve MH'nın önlenmesi araştırılmıştır. Literatür ve sanayi uygulamalarında işletmelerde söz konusu verilerin gerçek zamanlı takibinde daha çok DMÖ algoritmaları kullanıldığından çalışmada diğer daha fazla DMÖ'ne yoğunlaşmıştır. Çalışma ile İK ve MH'na neden olan etkenlerin proaktif şekilde tespitinde DMÖ algoritmalarına genel bir bakış açısı sağlanmak amaçlanmıştır, tarım, petrol, maden, ulaşım ve inşaat sektörlerinde kullanılan algoritmalar literatür desteğinde incelenmiştir.

## 3. Metodoloji

İK ve MH'nın ülke ekonomilerine olan maliyetleri incelendikten sonra, YZ'nı alt dalları olan genelde MÖ özelde DMÖ ile İK ve MH'na neden olan etkenlerin proaktif şekilde önlenmesinin önemine değinilmiş, DMÖ'nin teorik gelişim süreci anlatılmıştır. DMÖ algoritmalarının nasıl eğitilip ile test edildikleri konusu incelendikten sonra DMÖ'de ses, metin ve görüntü verilerinin nasıl işlendiği anlatılmıştır. Tarım, petrol, maden, ulaşım ve inşaat sektörlerinde kullanılan DMÖ algoritmalarına örnekler verilerek literatür eşliğinde analizler yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde;

- Artan nüfusla birlikte İK ve MH'dan kaynaklanacak maliyet artışları,
- YZ ile ilgili literatür çalışmalarının ne aşamada olduğu,
- ABD ve AB ülkelerinde İSG kapsamında YZ teknolojilerinin kullanımı ve
- Kullanılan sensör ve YZ tabanlı akıllı sistemler

hakkında literatür eşliğinde tartışma yapılmış, DMÖ algoritmaları ile çalışan İSG teknolojilerini kullanacak işverenlere kısa vadede karşılaşılabilecekleri engeller hakkında önerilerde bulunulmuştur.

#### 4. Literatür Araştırması ve Sektör Uygulamaları

Robotların, sesnsörlerle gördüklerini doğru bir şekilde tanıma yetenekleri %90'a kadar artmış bulunmaktadır (Tkach vd., 2011). ABD’de tarım, madencilik, petrol, ulaşım ve inşaat sektörlerinde DMÖ algoritmalarıyla çalışan YZ teknolojileri kullanılmakta olup bir kısım sesnsör ve DMÖ algoritmaları Tablo 3’de bir arada görülmektedir.

**Tablo 3.** Makine öğrenim algoritmaları ve sensör bilgileri (Pishgar vd., 2021)

Sektör	Sensör Türü	Makine Öğrenme Algoritma Türü
Tarım	Laser, Kamera, Eeg, Ultrasonic, Gps, Infrared Laser, Basınç, İvme, Ses	Sinyal Algılama Teorisi, Sdt, Svm, Görüntü İşleme, Doğrusal Karışık Model
Petrol	Sıcaklık, Basınç, Gaz, Rfid, Akış, Ses, Nem, Rüzgar, Gps	Svm, Gmm, Knn, Ann, Dönüştürme, Yerelleştirme
Madencilik	Hareket, Hız, Dönme, Manyetometre, Gps, Nem, Ses, Sıcaklık, Gaz, Toz, Nabız, Kızılötesi, Kamera, Sigara	Görüntü İşleme, Ann, Dt, Rf
Ulaşım	Kızılötesi, Kamera, EMG, Basınç, Araç, ECG, PPG, EOG, EEG, Hız, Dönme	GMM, Helly Model, ANN, CNN, Bayes Nöral Ağlar, Dijital Sinyal, İşleme, Bulanık Nöral Ağlar, Derin Öğrenme, İkili Karar, Sınıflama, ANN, NN, CNN
İnşaat	Basınç, Hareket, Hız, Ses, Dönme, Basınç, Elektromiyografi, Kamera, Titreşim, Ortam	Svm, Ann, Knn, Rbf, Ppca, Lda, Gmm, Hmm, Yüksek Seviye Bulanıklık, Petri Ağı, Karar Ağacı, Bilgisayar Görmesi, Navei Bayes, Desen Eşleştirme, Markov Zinciri

İşletmelerde yaralanma ve ölüm açısından tarım, madencilik, petrol, ulaşım ve inşaat önde gelen sektörlerdir. Söz konusu sektörlerde İK ve MH’na neden olan etkenleri gerçekleştirilmeden tespit eden DMÖ algoritmaları; PubMed, Google Scholar ve Scopus arama motorları kullanılarak incelenmiştir. İK ve MH’na neden olan etkenler Ramak Kala Olayların (RKO) koşullarıdır.

İş kazalarına neden olabilecek RKO güvenlik piramidinin en alt seviyesindedir (Reason, 1997). RKO ciddi iş kazalarına göre daha sık meydana gelmekle birlikte ölçekleri daha küçük olup her büyük iş kazasından önce bir dizi RKO yaşanmaktadır (Phimister vd., 2000). Literatürde, karayolu ve demiryolu trafiği (Wright ve Schaaf, 2004), tesis mühendisliği (Uth ve Wiese, 2004), bina güvenliği (Wu vd., 2010), ev güvenliği (Marsh ve Kendrick, 2000) ve sağlık sistemleri (Lyons vd., 2016) gibi iş kazalarına neden olabilecek RKO inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Orman işletmelerinde (Lilley vd, 2002), tarım sahalarında (Lundqvist ve Gustafsson, 1992), iş makineleri kullanımlarında (Raviv vd., 2017), demiryollarında (Wright ve Schaaf, 2004), inşaat sahalarında (Wu vd., 2010) RKO sıkça görülmektedir.

##### 4.1. Tarım Sektörü

Tarımda ilgili tehlikelerin bir sonucu olarak pestisitlen zehirlenme, biçerdöverlere kapılma, traktör devrilmesi, güneş çarpması gibi riskler bulunmaktadır. Diğer taraftan tarım robotları ekim ve hasat sırasındaki ağır işleri yapabilmektedir. İlaçlama ve sulama prosedürleri, aşılama ve kesme, ot ayıklama, budama, mahsullerin izlenmesi, haritalama, hava koşullarının takibi ve depolanma gibi işlerdeki tehlikeler riske dönüşmeden diğer bir ifadeyle İK ve MH’ı gerçekleştirilmeden tespit edilebilmektedir. Tehlikeli çalışma alanları önceden GPS, LIDAR, İnsansız Hava Araçları ve Drone ile belirlenerek işçilerin gitmesi önlenmekte İK’ı oluşmamaktadır (Feritias vd., 2012). Yarı otonom cihazlarla pestisitlerin etkili püskürtülme alanı tespit edilerek işçilerin kimyasala maruz kalması engellenmekte ve MH önlenmektedir. Tarım uçağı gibi gürültülü araçları kullanan işçilerinin maruz kaldığı titreşim takip edilmekte ve titreşim MH oluşmamaktadır (Calvo vd., 2018).

##### 4.2. Petrol ve Doğalgaz Sektörü

Petrol sektöründe yer altından çıkarılan ham petrol ve doğalgaz borularla taşınarak rafinerilerde işlenmekte ve motorin, benzin, doğalgaz gibi ürünler olarak tüketiciye sunulmaktadır. Sensörlerle endüstriyel operasyonların

proses değerlerinin yanı sıra işçilerin güvenliği ve sağlığı ile iş ekipmanlarının kritik çalışma değerleri takip edilebilmektedir. Arama, sondaj, rezervuar mühendisliği ve üretim operasyonlarında MÖ kullanılmakta, delme, inceleme ve erozyon kontrolü gibi zorlu işlerde akıllı robotlar kullanılmaktadır. Sıcaklık veya gaz seviyelerindeki artış tehlikeli olduğundan kuyulardaki seviye, sıcaklık ve gaz kritik değerleri sensörlerle takip edilmekte (Barani vd., 2013) çalışanlar GPS ile izlenmektedir.

- Ham petrol, doğalgaz ve bunlardan elde edilen ürünler taşınırken tıkanma, yangın, patlama ve çevre kirliliği gibi durumları önlemek için boru hattı ve tanker sensörleri kullanılmaktadır (Yu vd., 2012). Ham petrol ve doğalgaz işlenirken kullanılan basınç, sıcaklık ve seviye gibi arıza sensörleriyle olası yangın ve patlamaların önüne geçilerek İK ve MH'ı önlenmektedir (Jung vd., 2014).
- Giyilebilir saatler, akıllı kasklar ve akıllı gözlüklerle işçiler ve iş ortamı takip edilerek tehlikeli durumlar saptanmaktadır (Priyadarsyh vd., 2017).
- Görüntü algoritmalarıyla karadaki petrol sızıntıları (Ozigiris vd., 2019) tespit edilerek çevreye daha fazla yayılması ve halkın kimyasala maruz kalması engellenmektedir.

### 4.3. Madencilik Sektörü

Maden aranması ve çıkarılması tehlikeli koşullarda gerçekleşmektedir. Özellikle yer altı maden ocaklarında dar çalışma alanı, yetersiz aydınlatma ve havalandırma, göçük, patlama, yangın kaynaklı İK'ları ile toz ve bakteri kaynaklı MH'nı önlemek için DMÖ algoritmaları kullanılmaktadır. Özellikle yer altı maden ocaklarında İK ve MH için bir çok tehlike faktörü bulunmaktadır.

- Otonom matkaplar ve kesiciler kullanılarak işçiler ağır işlerden korunmakta ve göçük önlenmektedir (Ghasem vd., 2012). Havadaki zehirli gaz ve tozlar ile işçi ve iş araçları sensörlerle takip edilerek İK ve MH'ı önlenmektedir.
- Yer altında çalışan işçilerin konumu akıllı saat ve GPS ile (Johnson, 1998) vücut ısısı, nabız, kan basıncı gibi fizyolojik değerle ise sağlık sensörleriyle takip edilmektedir (Wang, 2006).
- Çevresel sensörlerle maden ocak havasında bulunan gürültü, zehirli gaz, toz ve bakteriler takip edilerek yangın, patlama kaynaklı İK'ları ile zehirlenme kaynaklı MH'ı önlenmektedir (Jones, 1995).
- Farklı tipte sensörler kullanan kablosuz kasklar, saatler, kameralar gibi giyilebilir cihazlar, hareket ve konumu izlemek, aşırı ortamları ölçmek ve çalışanların fizyolojik özelliklerini kaydetmek için kullanılmaktadır (Ghasem vd., 2012).
- Akıllı kask, gözlük ve giyilebilir yepek gibi cihazlarla hareketli sistemler ve çalışanlar takip edilebilmektedir.
- Akıllı kasklara, emniyet kemerlerine veya sırt çantasına takılan ve sensör içeren solunum tozu monitörleriyle zehirli toz ve bakteriler tespit edilebilmektedir.
- Güvenlik yepeği, akıllı gözlük ve kask ile akıllı saati birleştiren entegre yazılımları kullanmak mümkündür (Mardova, 2018).
- Tehlikeli yerlerde sigara içen işçinin anormal vücut hareketleri tespit edilebilmektedir (Parate vd., 2017).

### 4.4. Ulaşım Sektörü

Ulaştırımda kazalar ölümleri arttırmakta, ürüne zarar vermekte, lojistiği ve üretimi aksatmaktadır. Temel sebep yorgunluk olup belirtileri esneme, yavaş reaksiyon süresi, göz kapağının kapanması ve gevşek direksiyon tutuşudur. Literatürde genelde sürücü yorgunluğunu tespit eden çalışmalar bulunmaktadır. Ancak yorgunluğu ölçmede kullanılan Karolinska Uykululuk Ölçeği (Bekiaris vd.,2001) gibi standartlar yorgunluk algoritmalarıyla karıştırılmamalıdır. Göz kırpma süresi, kas gerginliği, tepki süresi gibi sürücü özellikleri (Körber vd., 2015) ile şerit ve hız takibi yapan hibrit algoritmalar kullanılarak önceden yorgunluk tespit edilebilmektedir.

- Biyolojik algoritmalar kalp, beyin ve kas aktivitesinden gelen verileri kullanmaktadır (Kaide vd., 2006).
- Foto Platisma Gram okumalarındaki değişiklikler yorgunluğu belirlemede kullanılmakta olup göz çevresinden elektrotlarla alınan veriler DzMO'de işlendiğinde, yanıt hatasının yorgunlukla artış anlamına geldiği belirtilmektedir (Li vd., 2013).
- Elektroensefalografi (EEG) ile alınan beyin dalgaları (Britton vd., 2016) ve elektromiyogramı (sEMG) ile tespit edilen kas aktivite seviyesinden de (De Lucca vd., 1984) yorgunluk tespit edilebilmektedir.
- Göz, ağız ve baş hareketleri gibi yüz ifadeleri, yorgunluğun en görünür belirtileridir. Göz, ağız, kafa-omuz, yüz hareketlerini aynı anda algılayıp analiz eden PERCLOS gibi ticari yazılımlar bulunmaktadır (Gengler,

2007). DMÖ ile yorgunluk tespit edildiği gibi yorulma sınıflandırılması da yapılabilmektedir (Dwivedi vd., 2014).

- Yüz algoritmalarını kullanan *Smart Eye*, *Anti Sleep* ve *OPTALERT* (Bretzner vd., 2005), göz kapağı ve göz bebeği aktivitesini kullanan *Sleep Diagnostics* ve gözbebeği ve kafa hareketini kullanan *Care Drive* gibi yazılımlarda DMÖ algoritmaları kullanılmaktadır.
- Yorgunluk sürücünün direksiyon açısı ve şerit sapması gibi durumları etkilemektedir. Araçta düzensiz pedal ve direksiyon kullanımından veya hareket sonucu basıncın şoför koltuğunda bir noktaya yoğunlaşmasından yorgunluk tespit edilebilmektedir (Altunkaya, 202).
- Sensörler direksiyon koluna, pedala ve koltuğa monte edilerek (Frugori vd., 2005) araç hızı, fren ve gaz pedalı ile öndeki araca olan mesafe ölçülerek yorgunluk tespit edilebilmektedir.
- Göz kapağı kapanması ile şerit konumu sapmasını takip eden sensörler araç ve sürücü özelliklerini aynı anda takip edebilmektedir (Cheng vd., 2012).

#### 4.5. İnşaat Sektörü

Şantiyelerde en büyük tehlike düşmedir. Giyilebilir cihazlardan, ortam ve kamera sensörlerinden (Khan vd., 2017) veya Bina Bilgi Modellemesinden (BBM) düşmeler tespit edilebilmektedir (Zhang vd., 2013). Sanayide ivmeölçer (Gibson vd., 2016) ve jiroskop (Jian vd., 2015) sensörleriyle desteklenmiş daha etkili düşme algılama sistemlerinin kullanımı mümkündür.

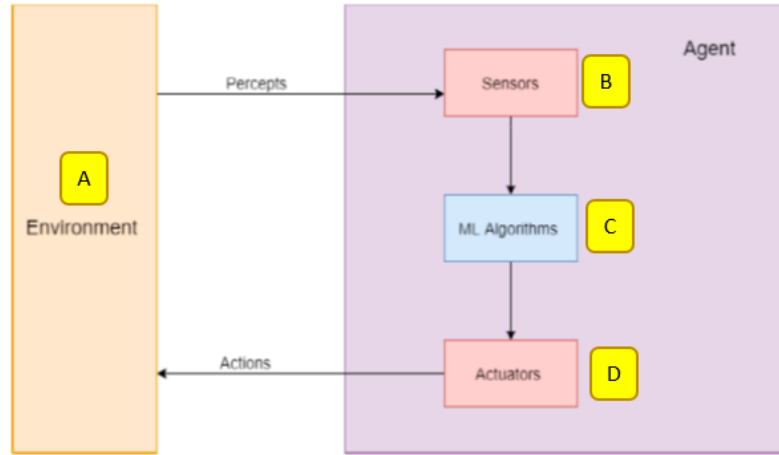
- Kamera sensörleriyle vücut hareketindeki şekil, duruş ve baş hareketindeki anormallikler tespit edilebilmektedir (Özcan vd., 2015).
- Basıncı, titreşim, kızılötesi gibi hareket sensörleri bireyi çevreleyen ortamdaki değişiklikler hakkında bilgi toplamaktadır (Alwan vd., 2006).
- Hareketlilik ve yürüyüş parametrelerinin doğru ölçümlerine göre anormallikler belirlenebilmektedir (Rimminen vd., 2010).
- Görüş tabanlı sensörler ise daha etkili sonuçlar vermektedir (Mubashir vd., 2013).
- Giyilebilir ve görüntü sensörlerini bir arada kullanan çalışmalar bulunmaktadır (Yu, 2008).
- Şantiyelerde düşme olaylarına dönüşebileceğinden dolayı ramak kala düşüşün tespiti çok önemlidir (Zhang vd., 2019).
- İnşaat yapılarında kullanılan iskelelerin çökmeden oluşabilecek tehlikelerin önlenmesi için iskele kolonlarından elde edilen metal gerinim değerlerinin takip edilmesi gerekmektedir (Sakharrma vd., 2019).
- Ses sensörleriyle elde edilen ses verileri DMÖ algoritmalarına beslendiğinde düşen işçinin bağırması çok farklı olacağından düşme tespit edilebilmektedir (Le vd., 2020).
- Adım ve adım mesafesi, ortalama hız ve maksimum ayak boşluğu gibi verilerle işçilerin anormal yürüyüş desenleri kontrol edilerek düştüğü veya yaralandığı anlaşılabilir (Yang vd., 2019).

#### 4.6. İSG’de YZ Uygulamalarının İncelenmesine Yönelik Yeni Bir Çerçeve Yaklaşımı

YZ’nın tanımlarından biri ortamdaki veri alan, verileri analiz eden ve analize dayalı olarak bir eylem gerçekleştiren bir aracının çalışmasıdır. RKO dahil İK ve MH’nın önlenmesi ancak iş kazaları ve meslek hastalıklarına neden olan faktörlerin önceden tespit edilerek önlenmesi ile mümkündür. Süreç, kamera ve sensör cihazları tarafından ortamdaki verilerin toplanması ile başlamakta, verilerin DMÖ algoritmaları aracılığıyla analiz edilmesi ve son olarak aktüatörler tarafından eylemin gerçekleştirilmesi ile son bulmaktadır (Pishgar vd., 2021). Şekil 7’de süreci anlatan model görülmektedir.

Modelin işleyişine bakıldığında; çevreden (Şekil 7-A) sensörlerle (Şekil 7-B) alınan veriler bulunmaktadır. Veriler kamera verileri de (video ve fotoğraflar da) olabilmektedir. Söz konusu veriler İK’na neden olabilecek tehlikeli durum ve davranışlar ile MH’larına neden olabilecek işyeri çalışma ortamı havasındaki sıcaklık, basınç, konsantrasyon gibi verileri içermektedir. Toplanan veriler, öncelikle ilgili DMÖ algoritmalarında eğitilmekte (Şekil 7-C) ve çıkan sonuçlar hareket ettiriciler (Şekil 7-D) aracılığı ile tekrar çevreye (Şekil 7-A) belirli eylemleri gerçekleştirmesi için gönderilmektedir.



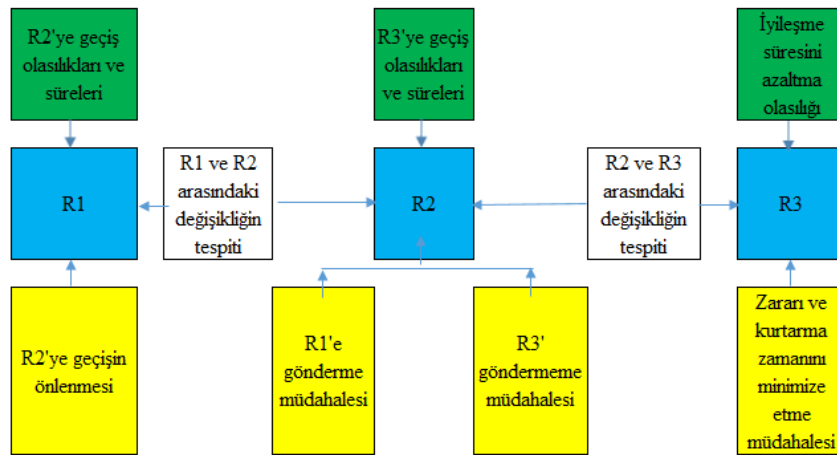


Şekil 7. Bir YZ sisteminin bileşenleri (Pishgar vd., 2021)

Şekil 7’de görüldüğü üzere çevreden (A) sensör ve kameralarla alınan veriler (B) önceden eğitilmiş MÖ algoritmalarında işlenmekte (C) ve sonuç bilgilere göre hareket ettiriciler (D) üzerinden tekrar çevreye (A) ilgili komut ve uyarılar iletilmektedir. Modelde süreç A,B, C ve D arasında sürekli bir döngüye sahiptir. Modelin çalışması aşağıdaki iki örnekle açıklanmıştır.

- Bir inşaat sahasında çalışan bir işçinin bot, baret ve emniyet kemeri takması zorunludur. İnşaat iskelesinde çalışan işçinin kamera görüntüleri, önceden eğitilmiş resimlerle karşılaştırıldığında işçinin bot, baret veya emniyet kemeri takıp takmadığı tespit edilerek saha yöneticilerine uyarı verilebilmektedir.
- Kargo taşıyan bir tır şoförünün anlık yüz görüntüleri önceden etiketlenen yorgun şoförün yüz görüntüleri ile karşılaştırılarak uyuklamaya geçebilecek şoföre mesaj gönderilmesi mümkündür.

Önerilen model (Pishgar vd., 2021) kapsamında İSG’de YZ uygulamalarını kategorize etmek için literatür dikkatlice gözden geçirilerek Şekil 8’deki çerçeve önerilmiştir ki önerilen çerçeve model, İK ve MH’nın nasıl meydana geldiğini tespit etmek için baskın bir paradigma olan İsviçre peynir modeline dayanmaktadır (Reason, 1990). Çerçeve model, bir işçinin tehlikelere maruz kalma riskini tahmin ve kontrol etmek için YZ teknolojilerinin ve yöntemlerinin nasıl kullanılabilirliğini sistemleştirmektedir.



Şekil 8. İK ve MH için Risk Gelişimi, Tespiti, Değerlendirilmesi ve Kontrolü Çerçevesi (Pishgar vd., 2021)

Şekil 8’de yeşil kutular, sonraki durumlara geçiş olasılığını tahmin edebilen teknolojileri gösterirken, beyaz kutular farklı güvenlik risk seviyeleri olan R1, R2 ve R3 durumları arasındaki geçişleri algılayabilen teknolojilerdir. Sarı kutular ise işçiyi güvende tutmak veya işle ilgili bir olayın etkisini azaltmak için müdahale stratejilerini göstermektedir. Bir çalışan, işinin doğası gereği herhangi bir zamanda farklı güvenlik risk seviyelerinde (R1, R2, R3) olabilmektedir (Şekil 8).

- R1 bir çalışanın tehlikeye maruz kalma riskinin minimum düzeyde olduğu veya hiç olmadığı ideal durumdur. Yöneticilerin ve İSG profesyonellerinin görevi işçiyi bu durumda tutmaktır. Ancak iş gereksinimleri ve mevcut teknolojiler ile çevresel faktörler sürekli olarak entropiyi artırarak ramak kala İK koşullarını ve MH'na neden olan çalışma havası ortamlarını oluşturmaktadır.
- R2'de çalışanlar işle ilgili riskler altındadır ancak yaralanma, ölüm, üretim araçları ve çevre zararı gibi zararlı bir olay yaşamamıştır. R2 tehlikeye maruz kalma ve artan yaralanma riskini göstermektedir. R2'de yaşanan İK'ları ramak kala olaylar olarak değerlendirilmektedir.
- R3 çalışanın sağlığını ve güvenliğini etkileyen işle ilgili zararlı bir olayın meydana geldiği ve neticede İK'nın yaşandığı ve/veya MH'nın oluştuğu durumdur.

Literatürdeki çalışmalar işçileri R1'de diğer bir ifadeyle riskin minimum düzeyde veya hiç olmadığı iş koşullarında tutacak YZ teknolojilerine yoğunlaşmıştır ve çalışanların risk durumunu R3'den R2'ye, R2'den R1'e düşürülmesini sağlayan YZ temelli çalışmalar literatürde çok fazla bulunmamaktadır (Şekil 8 sarı kutular). Diğer taraftan R1, R2 ve R3 konularına geçiş olasılıkları ve sürelerini belirleyen çalışmalar (Şekil 8 yeşil kutular) ile R1, R2 ve R3 konuları arasında değişiklikleri tespit eden çalışmalara (Şekil 8 beyaz kutular) literatürde çok az bulunmaktadır (Pishgar vd., 2021).

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Artan nüfus ve üretimle İK ve MH kaynaklı maliyetler büyümektedir (Yokoyama vd., 2013). Avrupa İş Sağlığı ve Güvenliği Ajansı söz konusu maliyetleri küresel hasılanan %3,9'u ve Avrupa hasılasının %3,3'ü olarak (EU-OSHA, 2017) belirtirken ILO ise küresel hasılanan %4'ü olarak tahmin etmektedir (Dorman, 2012). İK ve MH kaynaklı maliyetlerin ülke hasılasına % olarak oranlarını (Polonya %10,4 - İtalya %6,7 - Hollanda %3,6 - Almanya %3,3 ve Finlandiya %2,7) ve İK başı maliyetlerini (Hollanda 75.342 Avro, İtalya 58.411 Avro, Almanya 44.919 Avro, Finlandiya 43.069 Avro ve Polonya 38.918 Avro) veren çalışma (Tomba vd., 2021) incelendiğinde İK ve MH maliyetinin ülke hasılasına oranının ortalama %5,3 ve İK başına ortalama giderin 52.000 Euro olduğu görülmektedir.

Akademi ve endüstride karar verme, çevresel izleme, operasyonel maliyetleri düşürme ve üretkenliği artırma gibi sorunları çözmek için genelde MÖ'ni özelde DMÖ'ni kullanmaktadır. Robotla çalışan bir insanın İK riskinin 2 kat daha az olduğu belirlenmiştir (Freitas vd., 2012). İK'ni önleme açısından robotların gördüklerini doğru bir şekilde tanıma yetenekleri %90'a kadar artmıştır (Tkach vd., 2011). ABD tarım sektöründe MÖ uygulamalarının tarımsal iş robotlarında kullanımı ile ölümcül olayların sayısı 1990'ların başında yaklaşık 1000 vakadan 2019'da 600 vakanın altına düşmüştür (Issa vd., 2019). ABD madencilik sektöründe daha yüksek olan ölüm oranı YZ destekli MÖ uygulamalarıyla 2018 yılında 100.000 çalışan başına 10,4'e düşürülmüştür (NIOSH, 2019).

Robotik sistemlerin DMÖ ile eğitilerek optimize edebileceği görevler arasında (i) ağır, zor ve tehlikeli işlerin makinelerle yaptırılması, (ii) personel ve araçların konum takibi ile tehlikeli alanlara yaklaşımlarının önlenmesi, (iii) LIDAR ve DRONE gibi cihazların kullanımı ile işçilerin tehlikeli alanlarda çalıştırılmasının önlenmesi (iv) biyolojik sensörlerle çalışan sağlığının takip edilmesi ve uyku tespitinin yapılması (v) ortam sensörleri ile MH'na neden olabilecek etkenlerin tespit edilmesi ve daha ergonomik bir çalışma ortamının sağlanması yer almaktadır (Pishgar vd., 2021).

İş dünyası ve hükümetlerin İK ve MH kaynaklı maliyetleri azaltmak için anlık veri takibi ve değerlendirmesine imkan tanıyan DMÖ teknolojilerini kullanması faydalı olacaktır. Sanayi, tarım ve hizmet işletmelerinde sahadan kameralar ve sensörlerle toplanacak verilerin etiketlenerek (sisteme işlenerek/işaretlenerek) ilgili DMÖ algoritmalarına gönderilmesiyle, İK ve MH'na neden olacak tehlikeli durum ve davranışlar ile MH'na neden olan etkenler proaktif şekilde önlenirken üretim ve iş araçları ile çevre zararları da engellenmiş olacaktır.

Stanford Üniversitesinin 2022 YZ indeks raporuna göre 2021 yılında YZ konulu 364 bin yayının sadece %2,5'i DMÖ'ni içeren kontrol teorileri ile ilgilidir. Literatürde ve sanayide İK ve MH'nın önlenmesi kapsamında genelde MÖ özelde DMÖ'nin kullanımı ile ilgili geniş bir çalışma alanı bulunmaktadır. Bu tespitler kapsamında ABD'de bulunan Mesleki Robotik Araştırma Merkezi (CORR) ile Avrupa İSG Ajansı (EU-OSHA) çalışmalar yapmaktadır. ABD'de (i) tarım sektöründeki işlerde dron ve biyolojik sensörlerin, (ii) petrol ve gaz endüstrisinde zorlu ve tehlikeli işlerde akıllı robotların, (iii) maden sektöründe akıllı saat ve baretlerin, (iv) ulaşım sektöründe sürücü yorgunluğu tespit sistemlerinin ve (v) inşaat sektöründe düşme algılama sistemlerinin kullanılması ile İK ve MH'nın önlenmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Pishgar vd., 2021). AB'de ise İSG kapsamında akıllı dijital izleme sistemleri ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (EU-OSHA, 2023).

Literatür ve sanayi uygulamaları incelendiğinde, İK ve MH'na neden olan etkenlerin önlenmesinde DMÖ algoritmalarına yoğunlaştığı görülmektedir. Çalışan, çalışma ortamı ve iş araçları ile ekipmanlarında kullanılan sensörler tarafından anlık olarak toplanan veriler nesnelerin interneti üzerinden bulut bilişimde saklanarak DMÖ algoritmalarına beslenip riskli durumlar önceden tespit edilebilmektedir. Ses, titreşim, hareket, darbe, sıcaklık, toz, gaz, bakteri, bakım, görüntü, mesafe, yorgunluk gibi bir çok senör tipi olup bu sensörler kask, gözlük, saat, yelek, bot, eldiven gibi kişisel koruyucu donanımlara, iş araçlarına, çalışma ortamına ve ayrıca GPRS, Drone, LIDAR, kamera gibi cihazlara monte edilerek kullanılmaktadır.

Sensörlerden gelen veriler önceden eğitilen DMÖ algoritmalarında işlenerek örneğin devrilen kimyasal varil, yaralı işçinin yürüme şekli, boru hattı etrafındaki sızıntı gibi anormal durumlar tespit edilebilmektedir. Forklift gibi araçlarda kullanılan mesafe sensörleri ile işçi-ekipman mesafe takibinde kullanılan çoklu nesne izleme yazılımları ile tehlikeli alana girmesi durumunda işçi uyarılmaktadır. Tehlikeli alanlarda yapılacak işler, çalışanlara değil Drone, LIDAR gibi sensör kullanan cihazlara yaptırılmaktadır.

Sanayide genellikle yapılandırılmış veri içeren DMÖ teknolojileri kullanılırken, DzmÖ ve DÖ algoritmaları daha az kullanılmaktadır. Literatür araştırmalarının DMÖ'nde yoğunlaştığı görülmektedir.

İşletmeler İK ve MH'na neden olan etkenleri, işçi, ekipman ve ortama monte edecekleri ses, görüntü, hareket gibi sensörlerle gerçek zamanlı takip etmelidir. Toplanan veriler önceden eğitilen DMÖ algoritmalarında değerlendirilerek İK ve MH'na neden olan etkenler önceden tespit edilebilecektir.

DMÖ algoritmalarını içeren YZ teknolojilerini kullanacak işverenler kısa vadede uygulama engelleriyle karşılaşsalar da uzun vadede avatjaları daha fazla olacaktır.

- İK ve MH'nı önlemek için kurulacak dijital sistemlerin maliyeti ilk engel olacaktır. Denetimli makine algoritmalarını kuracak ve işletecek yazılımcı ve veri bilimciler ile dijital ekipmanları kullanacak işçilerin eğitimi bu süreçte aşılması gereken ikinci engel olacaktır.
- Bu temel engellerin aşılmasıyla veri korunması ve güvenlik prosedürleri gibi teknik engellerin de aşılması gerekecektir.
- Kurulacak DMÖ sistemleriyle İK ve MH verilerinin sistemde birikmesi sağlanacak ve yapılacak risk analizlerinde kullanımı sağlanmış olacaktır.
- İK ve MH azalacağından verimlilik artacak, mesleki kaza ve hastalık kaynaklı tazminatlar azalacak ve elde edilen kârlar ile yeni yatırımlar yapılabilecektir.

İşverenler, sanayide kullanılan üretim ve iş robotlarını içerecek şekilde genelde MÖ özelde DMÖ konusunda yasal düzenlemeler ve vergi kolaylıkları talep etmelidir. Bu kolaylıklar sayesinde temin edecekleri kredilerle gelecek için DMÖ kapsamında ARGE çalışmalarına yönelmeleri uzun vadeli bir stratejik karar olacaktır.

İşletmelerde İK ve MH'nı azaltmak için YZ algoritmalarını kullanan yazılım, makine ve robot gibi otonom sistemlerin kullanımı için hükümetler Enüdtü 4.0 ile uyumlu olacak şekilde yasal mevzuatları, sektörlerin görüşlerini dikkate alarak hazırlamalıdır.

### **Araştırmacıların Katkısı**

Bu araştırmada; Adnan Karabulut, makalenin giriş ve literatür taraması ile sonuçlar ve tartışma kısmına, Mehmet Baran ve Ergün Eraslan araştırma sürecinin izlenmesi ve kontrolü, literatür taraması ile sonuçlar ve tartışma kısmına katkı yapmışlardır.

### **Çıkar Çatışması**

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### **Kaynaklar**

Aki, Koray & Dirik, A. E. Derin Öğrenme Tabanlı Ve Pıd Kontrol Tabanlı Sürücüsüz Araç Sistemleri. Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi, 8(5), 306-316, 2020. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1409300>

Akşehir, Z. D., Pekel, E., Akleylek, S., Kılıç, E., & Yalçın, Oruç, İş Sağlığı Ve Güvenliği Sektöründe Bayes Ağları Uygulaması. Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği Dergisi, 12(1), 47-59. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/697396>

Altunkaya, C. (2022). Sürücü davranışlarını tespit eden ve tanımlayan yeni bir algoritma ile akıllı takograf geliştirilmesi= Development of smart tachograph with a novel algorithm detecting and recognition of driver behaviour. Erişim adresi: <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/98431>

Alwan, M.; Rajendran, P.J.; Kell, S.; Mack, D.; Dalal, S.; Wolfe, M.; Felder, R. A smart and passive floor-vibration based fall detector for elderly. In Proceedings of the 2006 2nd International Conference on Information & Communication Technologies, Damascus, Syria, 24–28 April 2006; pp. 1003–1007. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1684511>

Advancedsciencenews, Artificial neural networks that mimic the flexibility and computing power of the brain. Erişim adresi: <https://www.advancedsciencenews.com/artificial-neural-networks-that-mimic-the-flexibility-and-computing-power-of-the-brain/>

Bilgin, M. (2017). Gerçek veri setlerinde klasik makine öğrenmesi yöntemlerinin performans analizi. Breast, 2(9), 683. Erişim adresi: <https://ab.org.tr/ab17/bildiri/101.pdf>

Bhavsar, H., & Ganatra, A. (2012). A comparative study of training algorithms for supervised machine learning. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), 2(4), 2231-2307. Erişim adresi: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=18ca69ec35a0ab52922cb8a81d5041ac99005f3a>

Brynjolfsson, Erik, Tom Mitchell, and Daniel Rock. 2018. "What Can Machines Learn, and What Does It Mean for Occupations and the Economy?" AEA Papers and Proceedings, 108: 43-47. Erişim adresi: <https://www.aeaweb.org/articles/pdf/doi/10.1257/pandp.20181019>

Bagnell, J. A. (2005, July). Robust supervised learning. In AAAI (pp. 714-719). Erişim adresi: <https://cdn.aaai.org/AAAI/2005/AAAI05-112.pdf>

Botao Zhong, Xing Pan, Peter E.D. Love, Lieyun Ding, Weili Fang, Deep learning and network analysis: Classifying and visualizing accident narratives in construction, Automation in Construction, Volume 113, 2020, 103089,ISSN 0926-5805. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103089>

Barani, R.; Lakshmi, V.J. Oil well monitoring and control based on wireless sensor networks using Atmega 2560 controller. Int. J. Comput. Sci. Commun. Netw. 2013, 3, 341. Erişim adresi: <https://www.semanticscholar.org/paper/Oil-Well-Monitoring-and-Control-Based-on-Wireless-Barani-lakshmi/6dab898aecc3a91908202c08faa12b7f7866bc82>

Bekiaris, E.; Amditis, A.; Wevers, K. Advanced driver monitoring-the awake project. In Proceedings of the 8th World Congress on ITS, Sydney, Australia, 30 September–4 October 2001. Erişim adresi: <https://trid.trb.org/View/742734>

Britton, J.W.; Frey, L.C.; Hopp, J.L.; Korb, P.; Koubeissi, M.Z.; Lievens, W.E.; Pestana-Knight, E.M.; St. Louis, E.K. Electroencephalography (EEG): An Introductory Text. and Atlas of Normal and Abnormal Findings in Adults, Children, and Infants; American Epilepsy Society: Chicago, IL, USA, 2016. Erişim adresi: <https://europemc.org/article/nbk/nbk390354>

Bretzner, L.; Krantz, M. Towards low-cost systems for measuring visual cues of driver fatigue and inattention in automotive applications. In Proceedings of the IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Xi'an, Shaan'xi, China, 14–16 October 2005; pp. 161–164. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1563634>

Çelik, N. (2019). Sanayinin geleceği Endüstri 4.0 ve iş sağlığı ve güvenliği. Doktora tezi. İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İş Sağlığı Ve Güvenliği Anabilim Dalı. İstanbul, Türkiye. Erişim adresi: [https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/116492/yokAcikBilim\\_10269958.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/116492/yokAcikBilim_10269958.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Chao, W. L. , 2011. Machine Learning Tutorial. Erişim adresi: <https://cdn.geccacademy.cn/oa/upload/2021-09-28%2011-54-57-Machine%20Learning%20Tutorial.pdf>

Choudhary, R., & Gianey, H. K. (2017, December). Comprehensive review on supervised machine learning algorithms. In 2017 International Conference on Machine Learning and Data Science (MLDS) (pp. 37-43). IEEE. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8320256>

Ciortuz, L. Support Vector Machines for MicroRNA Identification, 2008. Erişim adresi: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=01652570befe1ef844cc60ec50a64ebd32dd62d1>

Calvo, A.; Romano, E.; Preti, C.; Schillaci, G.; Debolli, R. Upper limb disorders and hand-arm vibration risks with hand-held olive beaters. *Int. J. Ind. Ergon.* 2018, 65, 36–45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2018.01.018>

Cheng, B.; Zhang, W.; Lin, Y.; Feng, R.; Zhang, X. Driver drowsiness detection based on multisource information. *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.* 2012, 22, 450–467. doi: <https://doi.org/10.1002/hfm.20395>

Doğan, F., & Türkoğlu, İ. (2018). Derin öğrenme algoritmalarının yaprak sınıflandırma başarımlarının Karşılaştırılması. *Sakarya University Journal Of Computer And Information Sciences*, 1(1), 10-21. Erişim adresi: <http://saucis.sakarya.edu.tr/en/download/article-file/479189>

De Luca, C.J. Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 1984, 11, 251–279. Erişim adresi: <https://europepmc.org/article/med/6391814>

Dwivedi, K.; Biswaranjan, K.; Sethi, A. Drowsy driver detection using representation learning. In *Proceedings of the 2014 IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Gurgaon, New Delhi, India, 21–22 February 2014; pp. 995–999. Erişim tarihi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6779459>

Dorman P. Estimating the economic costs of occupational injuries and diseases in developing countries: essential information for decision makers. Geneva: International Labor Organization; 2012. Erişim adresi: [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms\\_207690.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_207690.pdf)

EU OSHA (European Occupational Health and Safety Agency). An international comparison of the costs of occupational accidents and sickness. 2017. Erişim adresi: [https://osha.europa.eu/sites/default/files/2021-11/international\\_comparison-of\\_costs\\_work\\_related\\_accidents.pdf](https://osha.europa.eu/sites/default/files/2021-11/international_comparison-of_costs_work_related_accidents.pdf)

EU-OSHA, Smart Digital Monitoring Systems For Occupational Safety And Health: Optimising The Uptake. Erişim adresi: [https://osha.europa.eu/sites/default/files/Smart-digital-monitoring-systems-Optimising-the-uptake\\_en.pdf](https://osha.europa.eu/sites/default/files/Smart-digital-monitoring-systems-Optimising-the-uptake_en.pdf)

Freitas, G.; Zhang, J.; Hamner, B.; Bergerman, M.; Kantor, G. A low-cost, practical localization system for agricultural vehicles. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Montreal, QC, Canada, 3–5 October 2012; pp. 365–375. Erişim tarihi: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33503-7\\_36](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33503-7_36)

Furugori, S.; Yoshizawa, N.; Iname, C.; Miura, Y. Estimation of driver fatigue by pressure distribution on seat in long term driving. *Rev. Automot. Eng.* 2005, 26, 53–58. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/294656833\\_Estimation\\_of\\_driver\\_fatigue\\_by\\_pressure\\_distribution\\_on\\_seat\\_in\\_long\\_term\\_driving](https://www.researchgate.net/publication/294656833_Estimation_of_driver_fatigue_by_pressure_distribution_on_seat_in_long_term_driving)

Freitas, G.; Zhang, J.; Hamner, B.; Bergerman, M.; Kantor, G. A low-cost, practical localization system for agricultural vehicles. In *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Montreal, QC, Canada, 3–5 October 2012; pp. 365–375. Erişim adresi: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33503-7\\_36](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33503-7_36)

Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., & Bengio, Y. (2016). *Deep learning* (Vol. 1). Cambridge: MIT press.

Ghasemi, E.; Ataei, M.; Shahriar, K.; Sereshki, F.; Jalali, S.E.; Ramazanzadeh, A. Assessment of roof fall risk during retreat mining in room and pillar coal mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2012, 54, 80–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.05.025>

Gengler, A. Are you on Track? *Money* 2007. p. 114. Available online. Erişim adresi: [https://money.cnn.com/magazines/moneymag/moneymag\\_archive/2007/01/01/8397408/index.htm](https://money.cnn.com/magazines/moneymag/moneymag_archive/2007/01/01/8397408/index.htm)

Gibson, R.M.; Amira, A.; Ramzan, N.; Casaseca-de-la-Higuera, P.; Pervez, Z. Multiple comparator classifier framework for accelerometer-based fall detection and diagnostic. *Appl. Soft Comput.* 2016, 39, 94–103. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.10.062>

Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y. W. (2006). A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural computation*, 18(7), 1527-1554. doi: <https://doi.org/10.1162/neco.2006.18.7.1527>

Hernán M.A., J. Hsu, B. Healy A second chance to get causal inference right: A classification of data science tasks *Chance*, 32 (1) (2019), pp. 42-49. doi: <https://doi.org/10.1080/09332480.2019.1579578>

ILO, World Statistic. Erişim adresi: [https://www.ilo.org/moscow/areas-of-work/occupational-safety-and-health/WCMS\\_249278/lang--en/index.htm](https://www.ilo.org/moscow/areas-of-work/occupational-safety-and-health/WCMS_249278/lang--en/index.htm)

Ingram, R. (2014). DoC Professor disputes whether computer ‘Eugene Goostman’ passed Turing Test. Imperial College London.

Issa, S.F.; Patrick, K.; Thomson, S.; Rein, B. Estimating the Number of Agricultural Fatal Injuries Prevented by Agricultural Engineering Developments in the United States. *Safety* 2019, 5, 63. Erişim adresi: <https://www.mdpi.com/2313-576X/5/4/63>

J. Wu, J. He ve Y. Todo, " Dendritic neuron model is a universal predictor ", 2019 6. Uluslararası Sistemler ve Bilişim Konferansı (ICSAI) , 2019, s. 589-594. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/339556596\\_The\\_dendritic\\_neuron\\_model\\_is\\_a\\_universal\\_approximator](https://www.researchgate.net/publication/339556596_The_dendritic_neuron_model_is_a_universal_approximator)

J. Alzubi, A. Nayyar, A. Kumar, *Journal of Physics: Conference Series* , Volume 1142 , Second National Conference on Computational Intelligence (NCCI 2018), IOP Publishing Ltd. Erişim adresi: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1142/1/012012/pdf>

Javapoint , Artificial Neural Network Tutorial. Erişim adresi: <https://www.javatpoint.com/artificial-neural-network>

Jiang T., Jaimie L. Gradus, Anthony J. Rosellini, *Supervised Machine Learning: A Brief Primer*, Behavior Therapy, Volume 51, Issue 5, 2020, Pages 675-687, ISSN 0005-7894. Erişim adresi: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32800297/>

Jung, J.; Song, B. The possibility of wireless sensor networks for industrial pipe rack safety monitoring. In Proceedings of the 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences, Waikoloa, HI, USA, 6–9 January 2014; pp. 5129–5134.

Johnson, L. GPS in mining. *Mining Magazine*, 7 August 1998; 387–389.

Jones, K.W. Environmental Sensors. In *Sensors: Micro- and Nanosensor Technology-Trends in Sensor Markets*; Meixner, H., Jones, R., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 1995; pp. 451–489.

Jian, H.; Chen, H. A portable fall detection and alerting system based on k-NN algorithm and remote medicine. *China Commun.* 2015, 12, 23–31. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/277562142\\_A\\_Portable\\_Fall\\_Detection\\_and\\_Alerting\\_System\\_Based\\_on\\_k-NN\\_Algorithm\\_and\\_Remote\\_Medicine](https://www.researchgate.net/publication/277562142_A_Portable_Fall_Detection_and_Alerting_System_Based_on_k-NN_Algorithm_and_Remote_Medicine)

Körber, M.; Cingel, A.; Zimmermann, M.; Bengler, K. Vigilance decrement and passive fatigue caused by monotony in automated driving. *Procedia Manuf.* 2015, 3, 2403–2409. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.499>

Kaida, K.; Takahashi, M.; Åkerstedt, T.; Nakata, A.; Otsuka, Y.; Haratani, T.; Fukasawa, K. Validation of the Karolinska sleepiness scale against performance and EEG variables. *Clin. Neurophysiol.* 2006, 117, 1574–1581. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2006.03.011>

Khan, S.S.; Hoey, J. Review of fall detection techniques: A data availability perspective. *Med. Eng. Phys.* 2017, 39, 12–22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.10.014>

Kaynar, O., Görmez, Y., Yıldız, M., & Albayrak, A. (2016, September). Makine öğrenmesi yöntemleri ile Duygu Analizi. In *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'16)* (Vol. 17, No. 18, pp. 17-18). Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/profile/Yasin-Goermez/publication/311136507\\_Makine\\_Ogrenmesi\\_Yontemleri\\_ile\\_Duygu\\_Analizi\\_-\\_Sentiment\\_Analysis\\_with\\_Machine\\_Learning\\_Techniques/links/583eaaac08ae8e63e617b96c/Makine-Oegrenmesi-Yoentemleri-ile-Duygu-Analizi-Sentiment-Analysis-with-Machine-Learning-Techniques.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yasin-Goermez/publication/311136507_Makine_Ogrenmesi_Yontemleri_ile_Duygu_Analizi_-_Sentiment_Analysis_with_Machine_Learning_Techniques/links/583eaaac08ae8e63e617b96c/Makine-Oegrenmesi-Yoentemleri-ile-Duygu-Analizi-Sentiment-Analysis-with-Machine-Learning-Techniques.pdf)

Leigh, J., Macaskill, P., Kuosma, E., & Mandryk, J. (1999). Global burden of disease and injury due to occupational factors. *Epidemiology*, 626-631. Erişim adresi: [https://journals.lww.com/epidem/abstract/1999/09000/global\\_burden\\_of\\_disease\\_and\\_injury\\_due\\_to.32.aspx](https://journals.lww.com/epidem/abstract/1999/09000/global_burden_of_disease_and_injury_due_to.32.aspx)

Li, G.; Chung, W.-Y. Detection of Driver Drowsiness Using Wavelet Analysis of Heart Rate Variability and a Support Vector Machine Classifier. *Sensors* 2013, 13, 16494–16511. doi: <https://doi.org/10.3390/s131216494>

Lee, Y.-C.; Shariatfar, M.; Rashidi, A.; Lee, H.W. Evidence-driven sound detection for prenotification and identification of construction safety hazards and accidents. *Autom. Constr.* 2020, 113, 103127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103127>

Lyons PG, Arora VM, Farnan JM. Adverse events and near-misses relating to intensive care unit–ward transfer: a qualitative analysis of resident perceptions. *Ann Am Thorac Soc.* 2016;13:570–572. doi: <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201512-789LE>

Lilley R, Feyer AM, Kirk P, et al. A survey of forest workers in New Zealand: do hours of work, rest, and recovery play a role in accidents and injury? *J Safety Res.* 2002;33:53–71. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00003-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00003-8)

Lundqvist P, Gustafsson B. Accidents and accident prevention in agriculture a review of selected studies. *Int J Ind Ergonom.* 1992;10:311–319. doi: [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(92\)90098-K](https://doi.org/10.1016/0169-8141(92)90098-K)



Muhammad, L. J., Algehyne, E. A., Usman, S. S., Ahmad, A., Chakraborty, C., & Mohammed, I. A. (2021). Supervised machine learning models for prediction of COVID-19 infection using epidemiology dataset. *SN computer science*, 2(1), 1-13. Erişim adresi: [https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-020-00394-7%23auth-L\\_J\\_-Muhammad](https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-020-00394-7%23auth-L_J_-Muhammad)

Muhammad, S., Petridis, A., Cornelius, J. F., & Hänggi, D. (2020). Letter to editor: Severe brain haemorrhage and concomitant COVID-19 Infection: A neurovascular complication of COVID-19. *Brain, behavior, and immunity*, 87, 150. Erişim adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7199686/>

Moor, James. *AI MAGAZINE*; WIN 2006; 27; 4; p87-p91.

Mardonova, M.; Choi, Y. Review of Wearable Device Technology and Its Applications to the Mining Industry. *Energies* 2018, 11, 547 doi: <https://doi.org/10.3390/en11030547>

Mubashir, M.; Shao, L.; Seed, L. A survey on fall detection: Principles and approaches. *Neurocomputing* 2013, 100, 144–152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2011.09.037>

Marsh P, Kendrick D. Near miss and minor injury information - can it be used to plan and evaluate injury prevention programmes? *Accident Anal Prev.* 2000;32:345–354. doi: [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(99\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(99)00054-8)

Nasteski, V. (2017). An overview of the supervised machine learning methods. *Horizons. b*, 4, 51-62. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Nasteski/publication/328146111\\_An\\_overview\\_of\\_the\\_supervised\\_machine\\_learning\\_methods/links/5c1025194585157ac1bba147/An-overview-of-the-supervised-machine-learning-methods.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vladimir-Nasteski/publication/328146111_An_overview_of_the_supervised_machine_learning_methods/links/5c1025194585157ac1bba147/An-overview-of-the-supervised-machine-learning-methods.pdf)

Number and Rate of Occupational Mining Fatalities by Year, 1983–2019. Erişim adresi: <https://www.cdc.gov/NIOSHMining/MMWC/Fatality/NumberAndRate>

Osisanwo, F. Y., Akinsola, J. E. T., Awodele, O., Hinmikaiye, J. O., Olakanmi, O., & Akinjobi, J. (2017). Supervised machine learning algorithms: classification and comparison. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 48(3), 128-138. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/profile/J-E-T-Akinsola/publication/318338750\\_Supervised\\_Machine\\_Learning\\_Algorithms\\_Classification\\_and\\_Comparison/links/596481dd0f7e9b819497e265/Supervised-Machine-Learning-Algorithms-Classification-and-Comparison.pdf](https://www.researchgate.net/profile/J-E-T-Akinsola/publication/318338750_Supervised_Machine_Learning_Algorithms_Classification_and_Comparison/links/596481dd0f7e9b819497e265/Supervised-Machine-Learning-Algorithms-Classification-and-Comparison.pdf)

Ozigis, M.S.; Kaduk, J.D.; Jarvis, C.H. Mapping terrestrial oil spill impact using machine learning random forest and Landsat 8 OLI imagery: A case site within the Niger Delta region of Nigeria. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019, 26, 3621–3635. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-018-3824-y>

Ozcan, K.; Velipasalar, S. Wearable camera-and accelerometer-based fall detection on portable devices. *IEEE Embed. Syst. Lett.* 2015, 8, 6–9. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7289390>

Özgür, A. , 2004. Supervised and unsupervised machine learning techniques for text document categorization, Doktora Tezi-Bogaziçi Üniversitesi.

Özden, C., & Çiğdem, A. C. I. (2018). Makine öğrenmesi yöntemleri ile yaralanmalı trafik kazalarının analizi: Adana örneği. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(2), 266-275. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/465768>

Peres R.S., X. Jia, J. Lee, K. Sun, AW Colombo ve J. Barata, "Industrial artificial intelligence in Industry 4.0 - Systematic Review, Challenges and Outlook", *IEEE Access* , cilt. 8, s. 220121-220139, 2020, Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9285283>



Pishgar, M., Issa, S. F., Sietsema, M., Pratap, P., & Darabi, H. (2021). REDECA: a novel framework to review artificial intelligence and its applications in occupational safety and health. *International journal of environmental research and public health*, 18(13), 6705. Erişim adresi: <https://www.mdpi.com/1660-4601/18/13/6705>

Priyadarshy, S. IoT revolution in oil and gas industry. In *Internet of Things and Data Analytics Handbook*; Wiley Telecom: New York, NY, USA, 2017; pp. 513–520. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119173601.ch31>

Parate, A.; Ganesan, D. Detecting Eating and Smoking Behaviors Using Smartwatches. In *Mobile Health*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 175–201. Erişim adresi: <https://people.cs.umass.edu/~dganesan/papers/mHealthBook-Parate17.pdf>

Phimister JR, Oktem U, Kleindorfer PR, et al. Near-miss system analysis: phase I. Philadelphia (PA): Wharton School, Center for Risk Management and Decision Processes; 2000. doi: <https://doi.org/10.1111/1539-6924.00326>

Rimminen, H.; Lindström, J.; Linnavuo, M.; Sepponen, R. Detection of falls among the elderly by a floor sensor using the electric near field. *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.* 2010, 14, 1475–1476. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5477180>

Reason JT. *Managing the risks of organizational accidents*. Aldershot: Ashgate; 1997.

Reason, J. The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B* 1990, 327, 475–484. Erişim adresi: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstb.1990.0090>

Raviv, G., Fishbain, B., & Shapira, A. (2017). Analyzing risk factors in crane-related near-miss and accident reports. *Safety science*, 91, 192-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.08.022>

Singh A., N. Thakur and A. Sharma, "A review of supervised machine learning algorithms," 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), 2016, pp. 1310-1315. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7727382>

Suthaharan, S. (2016). *Supervised learning algorithms*. In *Machine learning models and algorithms for big data classification* (pp. 183-206). Springer, Boston, MA.

Shetty, S. H., Shetty, S., Singh, C., & Rao, A. (2022). *Supervised Machine Learning: Algorithms and Applications. Fundamentals and Methods of Machine and Deep Learning: Algorithms, Tools and Applications*, 1-16. doi: <https://doi.org/10.1002/9781119821908.ch1>

Sakhakarmi, S.; Park, J.; Cho, C. Enhanced machine learning classification accuracy for scaffolding safety using increased features. *J. Constr. Eng. Manag.* 2019, 145, 04018133. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001601](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001601)

Takala J., Päivi Hämäläinen, Kaija Leena Saarela, Loke Yoke Yun, Kathiresan Manickam, Tan Wee Jin, Peggy Heng, Caleb Tjong, Lim Guan Kheng, Samuel Lim & Gan Siok Lin (2014) Global Estimates of the Burden of Injury and Illness at Work in 2012, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11:5, 326-337. doi: <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.863131>

Tkach, I.; Bechar, A.; Edan, Y. Switching between collaboration levels in a human–robot target recognition system. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C (Appl. Rev.)* 2011, 41, 955–967. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5740373>

Tompa, E., Mofidi, A., van den Heuvel, S. ve ark. İş yaralanmaları ve hastalıklarının ekonomik yükü: beş Avrupa Birliği ülkesinde bir çerçeve ve uygulama. BMC Halk Sağlığı 21, 49 (2021). Erişim adresi: <https://745e9234ede24d509e2ae15e4d48ef6be2b3b85c.vetisonline.com/article/10.1186/s12889-020-10050-7>

Turhost, Makine Öğrenmesi. Erişim adresi: <https://www.turhost.com/blog/makine-ogrenmesi-machine-learning-nedir/>

Towardsdatascience, Understanding Confusion Matrix. Erişim adresi: <https://towardsdatascience.com/understanding-confusion-matrix-a9ad42dcfd62>

Uth HJ, Wiese N. Central collecting and evaluating of major accidents and near-miss-events in the Federal Republic of Germany - results, experiences, perspectives. J Hazard Mater. 2004;111:139–145. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.022>

V7labs, Görüntü Tanıma Tanımı, Algoritmaları ve Kullanımları. Erişim adresi: <https://www.v7labs.com/blog/image-recognition-guide>

Wang, J. Electrochemical biosensors: Towards point-of-care cancer diagnostics. Biosens. Bioelectron. 2006, 21, 1887–1892. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2005.10.027>

Wright L, Schaaf T. Accident versus near miss causation: a critical review of the literature, an empirical test in the UK railway domain, and their implications for other sectors. J Hazard Mater. 2004;111:105–110. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.049>

Wu W, Gibb AG, Li Q. Accident precursors and near misses on construction sites: an investigative tool to derive information from accident databases. Safety Sci. 2010;48:845–858. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.04.009>

Wu, W., Yang, H., Chew, D. A., Yang, S. H., Gibb, A. G., & Li, Q. (2010). Towards an autonomous real-time tracking system of near-miss accidents on construction sites. Automation in Construction, 19(2), 134-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.017>

Webtekno. Erişim adresi: <https://www.webtekno.com/turing-testi-gelisen-robotik-bilimi-nedeniyle-guncelleniyor-h73504.html>

Xin Zhang, Wang Dahu, Application of artificial intelligence algorithms in image processing, Journal of Visual Communication and Image Representation, Volume 61, 2019, Pages 42-49, ISSN 1047-3203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2019.03.004>

Yu, H.; Guo, M. An efficient oil and gas pipeline monitoring systems based on wireless sensor networks. In Proceedings of the 2012 International Conference on Information Security and Intelligent Control, Yunlin, Taiwan, 14–16 August 2012; pp. 178–181. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6449735>

Yu, X. Approaches and principles of fall detection for elderly and patient. In Proceedings of the HealthCom 2008-10th International Conference on E-health Networking, Applications and Services, Singapore, 7–9 July 2008; pp. 42–47. Erişim adresi: <https://c85689232ea394a8dc08a512c1f46793a2397178.vetisonline.com/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4600107>

Yang, K.; Ahn, C.R.; Kim, H. Validating ambulatory gait assessment technique for hazard sensing in construction environments. Autom. Constr. 2019, 98, 302–309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.09.017>

Yokoyama, K., Iijima, S., Ito, H., & Kan, M. (2013). The socio-economic impact of occupational diseases and injuries. Industrial health, 51(5), 459–461. Erişim adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4202730/>

Zhang, S.; Teizer, J.; Lee, J.-K.; Eastman, C.M.; Venugopal, M. Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Autom. Constr.* 2013, 29, 183–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>

Zhang, M.; Cao, T.; Zhao, X. Using Smartphones to Detect and Identify Construction Workers' Near-Miss Falls Based on ANN. *J. Constr. Eng. Manag.* 2019, 145, 04018120. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001582](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001582)



# Journal of Turkish Operations Management

## Sosyal medya reklam platformu seçimi üzerine yeni bir oyun - teorik yaklaşım

Furkan Göktaş<sup>1\*</sup>, Mehmet Gökerik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü, Karabük

furkangoktas@karabuk.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9291-3912>

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü, Karabük

mehmetgokerik@karabuk.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-0827-5805>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 11.04.2023

Revize: 26.08.2023

Kabul: 31.08.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Bulanık mantık,  
Çok kriterli karar verme,  
Oyun teorisi,  
Sosyal Medya,  
Reklam

### ÖZET

İşletmeler pazardaki konumu korumak ya da pazar payını artırmak için birçok pazarlama iletişimi çabalarından yararlanmaktadır. Bir pazarlama iletişimi aracı olan reklam kampanyası, sosyal medya platformlarında uygulandığında işletmelerin bütçelerinde bir gider olacaktır. Bu çalışmanın amacı bir gerçek dünya problemi için sosyal medya reklam platformu seçiminin bütçe perspektifi açısından incelenmesidir. Bu kapsamda oyun teorisine dayanan yeni bir bulanık çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım Oyun - Teorik Bulanık Değerlendirme Sistemi (G-FES) olarak adlandırılmıştır. G-FES ile yapılan uygulamada Twitter platformuna en yüksek kaynağın ayrılması gerektiği bulunmuştur. Öte yandan bu sonuçlar ilgili şirket ve uzmanlar özelinde olup genelleştirilemez. Literatürdeki çalışmaların sonuçları birbirlerinden farklıdır. Beklediğimiz üzere, bu çalışmada elde edilen sonuçlar için de benzer durum geçerlidir.

## A novel game - theoretical approach on the social media advertisement platform selection

### Article Info

#### Article History:

Received: 11.04.2023

Revised: 26.08.2023

Accepted: 31.08.2023

#### Keywords:

Fuzzy logic,  
Multi-criteria decision making,  
Game theory,  
Social media,  
Advertisement

### Abstract

Businesses benefit from many marketing communication efforts to maintain their market positions or increase their market shares. When the advertising campaign, which is a marketing communication tool, is implemented on social media platforms, there will be an expense in the budgets of businesses. The purpose of this study is to examine the social media advertising platform selection from the budget perspective for a real-world problem. In this scope, we propose a novel fuzzy multi-criteria decision making (MCDM) approach based on the game theory. We call it as Game-Theoretical Fuzzy Evaluation System (G-FES). In our application with G-FES, we find that the highest resource needs to be allocated to the Twitter platform. On the other hand, these results are specific to the relevant company and experts and thus they cannot be generalized. The results of the studies in the literature are different from each other. As we expect, the same is true for the results obtained in this study.

## 1. Giriş

Teknolojilerin ve iletişim araçlarının ilerlemesi ve sürekli gelişimi, pazarlamacılara birçok yeni yaratıcı ve etkili tanıtım biçimi sunmaktadır. Pazarlamacıların imkanlarını ve pazarlama stratejilerini sürekli olarak daha yüksek bir seviyeye taşıyan internetin çevrimiçi ortamıdır (Stefko ve diğ., 2013). Çevrimiçi ortamların günümüzde en yaygın araçlarından biri olan sosyal medyanın ortaya çıkmasıyla, ürün/hizmet ile ilgili birçok farklı türde içeriğin tüketicilere ulaştırılabileceği çeşitli platformlar aracılığıyla, işletmenin tüketicilerle iletişim ve etkileşim kurabileceği yollar oluşmuştur (Straker ve diğ., 2015). Bununla birlikte sosyal medya son yıllarda, bir ürün/hizmet/işletmenin başarısını yönlendiren belirgin ve önemli bir pazarlama faktörü olarak kabul görmeye başlamıştır (Hawkins & Vel, 2013).

Günümüzde sosyal medya platformları, her zamankinden daha fazla tüketici istek ve ihtiyaçlarını karşılamak üzere evrilmekte ve gelişmektedir. Sosyal medya kullanımının tüketicilerin hayatlarına katabileceği değer her zamankinden daha belirgin hale gelmiştir (Nyagadza, 2020). Smart Insight 2023 küresel sosyal medya istatistik raporuna göre; dünya nüfusunun %59,4'ü sosyal medyayı kullanmaktadır. Bu sosyal medya platformlarından sırasıyla Facebook, Youtube, Instagram, Tiktok, Reddit, Twitter vb. tüketiciler tarafından en fazla tercih edilenlerdir. Aynı zamanda dünyada bu platformlara tüketiciler tarafından günlük ortalama 2.5 saat vakit ayrılmaktadır (Dateportal, 2023). Bu istatistiklere bakıldığında sosyal medya platformlarının işletmeler için oldukça önemli hale geldiği görülmektedir.

İşletmeler başarılı olabilmek için bütçelerinin kayda değer bir kısmını reklamlara harcamaktadır (Chi, 2011; Okazaki ve Taylor, 2013). Bu reklamlar aynı zamanda işletmeleri ve ürünlerini popülerleştirmek ve tüketicilerin hafızalarında bir imaj oluşturmak için de kullanılmaktadır (Mizik ve Jacobson, 2003). Bu açıdan sosyal medya reklam içerikleri, yayılması ve nispeten daha uygun bütçeli olmasıyla etkili bir platform haline gelmiştir (Bruhn ve diğ., 2012).

Reklama yönelik ne kadar harcama yapılacağı, işletmeleri sürekli meşgul eden bir karardır. Medya maliyeti ve reklam harcamalarının artması, mali kontrolün daha sıkı hale gelmesiyle birlikte konunun önemi artmıştır. Pazarlama departmanları, reklam harcamalarının yararlılığını ve bunun gelir ve kârla ilişkisini göstermekle giderek daha fazla ilgilenmektedir (Bigné, 1995). İşletmelerin reklam stratejilerinin diğer önemli bir tarafı da markayı olabildiğince potansiyel tüketiciyle tanıştırmak için sınırlı bir bütçe kullanarak reklam fonlarının zaman içinde nasıl tahsis edileceğini belirlemektir (Nerlove ve Arrow, 1962; Vidale ve Wolfe, 1957). Örneğin; işletmeler 2017 yılı boyunca, sosyal medya tabanlı reklam kampanyaları için 22 milyar dolardan fazla para harcamış bu da o seneye ait tüm reklam giderlerinin yüzde 25'inden fazlasını oluşturmuştur (Luzon ve diğ., 2022). İşletmeler ortalama olarak yıllık gelirlerinin yaklaşık yüzde 10 ila 13'ünü pazarlamaya harcamaktadır. Harcanan bütçenin yaklaşık yüzde 25'i, arama motorları ve sosyal medya gibi çeşitli reklam platformlarını içerebilen ücretli medyaya aktarılmaktadır. Bununla birlikte, işletmelerin sosyal medya reklam stratejileri farklılık gösterse de, işletmeler sosyal medya reklamları için günde ortalama 200 ila 350 dolar harcamaktadır. Ayrıca 2022 yılında işletmelerin sosyal medya platformlarında reklam için harcadıkları bütçe 17.5 milyar dolar iken, 2027 yılında bu bütçenin 51.8 milyar dolar olması beklenmektedir (Berry, 2021; Market Research Report, 2023). Bu bütçe raporlarına bakıldığında sosyal medya platformlarına verilen reklamların bütçeleri işletmeler için oldukça öneme sahip olduğu görülmektedir.

Bu çalışmanın amacı bir gerçek dünya problemi için sosyal medya reklam platformu seçiminin incelenmesidir. Sosyal medya reklam platformu seçimi, ÇKKV problemidir. Kriterler belirlenirken hem uzman görüşlerine başvurulmuş hem de akademik çalışmalar incelenmiştir (Tavana ve diğ., 2013; Saçan ve Tamer, 2021; Sudipa ve diğ., 2020; Yücenur ve diğ., 2022; Çalık, 2020; Enyinda ve diğ., 2018). Bu inceleme sonucunda içerik, popülerlik, analizler ve raporlar, maliyet, hedef kitle uyumu ve kullanım kolaylığı kriterleri belirlenmiştir. Bununla birlikte sosyal medya platformu seçimi için alternatifler belirlenmiştir. Bu alternatifler belirlenirken de Dateportal'ın 2023'ün raporuna göre en fazla kullanılan sosyal medya platformlarından Facebook, Instagram, Youtube ve Twitter tercih edilmiştir. Söz konusu problemin çözümü için oyun teorisine dayanan yeni bir bulanık ÇKKV yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım Oyun-Teorik Bulanık Değerlendirme Sistemi (G-FES) olarak adlandırılmıştır. Bu çalışmanın özgünlüğü ve literatüre ana katkısı, bulanık ortalama ve standart sapma tanımlarını kullanarak bulanık ÇKKV problemini iki oyunculu sıfır toplamli oyunun çözümüne indirgeyen yeni bir ÇKKV yaklaşımının önerilmesidir. Buradaki ana motivasyon unsuru, karar vermede güçlü bir araç olan oyun teorisinden faydalanabilmektir. Diğer bir motivasyon unsuru ise kullanım kolaylığına sahip, karar vericinin riskten kaçınma derecesini dikkate alan ve dayanıklı olan yeni bir yaklaşımla önemli bir işletme probleminin çözülmesidir.

Bu çalışmanın kalanı şu şekildedir. Bölüm 2'de sosyal medya reklam platformu seçimi için kavramsal çerçeve verilmiştir. Bölüm 3'te bu çalışmada önerilen G-FES tanıtılmıştır. Bölüm 4'te Konya'da elektronik alanında uzun süredir faaliyet gösteren bir işletmenin sosyal medya reklam platformu seçimi için G-FES kullanılmıştır. Bölüm 5 ile çalışma sonuçlandırılmıştır.

## 2. Kavramsal Çerçeve

Sosyal medya; web günlükleri, sosyal bloglar, mikrobloglar, podcast'ler, fotoğraflar, videolar, derecelendirme ve sosyal yer imleri dahil olmak üzere Web 2.0 temelinde ortaya çıkan ve kullanıcılar tarafından oluşturulan içeriğin paylaşılmasına, değiştirilmesine izin veren internet tabanlı uygulama olarak tanımlanmaktadır (Kaplan ve Haenlein, 2010; Ismail, 2017). Diğer bir tanımla sosyal medya; çevrimiçi uygulama ve platformlar aracılığı ile iş birliği, içerik paylaşımı ve etkileşim amacıyla faaliyet yürüten bir sosyal araç olduğu belirtilmiştir (Erkan ve Evans, 2016). Twitter, Facebook, Youtube, Instagram vb. olmak üzere birçok farklı platform ile karşımıza çıkan sosyal medya, benzer yaşam tarzı gruplarını bu uygulamalar aracılığı ile seçebildikleri için sosyal medya pazarlaması reklamcılar için de önemli hale gelmiştir (Lee ve diğ., 2018).

Sosyal medya, son yıllarda pazarlama yöneticileri tarafından oldukça kabul gören ve tercih edilen en önemli dijital pazarlama kanallarından biri haline gelmiştir (Iankova ve diğ.,2019). Sosyal medyada kullanıcılar; gönderiler, tweetler, paylaşımlar, beğeniler ve birtakım incelemeler yoluyla bilgi üretmeye ve deneyimlerini arkadaşları ve takipçileriyle paylaşmaya, aynı zamanda çevrimiçi marka toplulukları oluşturmaya isteklidirler (Jacobson ve diğ., 2020). Günümüzde sosyal medyanın, blogların, podcast'lerin ve web günlüklerinin kullanımı, ticari kuruluşlar arasında pazarlama amacıyla katlanarak artmış bulunmaktadır. Pazarlamacılar; markalaşma, müşteri ilişkileri yönetimi, satış promosyonları, reklam ve halkla ilişkiler faaliyetleri dahil olmak üzere çeşitli sonuçlara ulaşmak için sosyal medyaya odaklanmaktadır. Markalaşma ve marka bilinci oluşturma bağlamında ise sosyal medya reklamlarının uygulanması son yıllarda önemli ölçüde arttığından dolayı pazarlama yöneticilerine çok sayıda avantajlar sağlamaktadır (Kumar ve diğ., 2022).

Sosyal medya platformları, kullanıcılar tarafından oluşturulan içeriklere dayanan, kullanıcıların içeriği düzenleyebildiği, değiştirebildiği ve diğer kullanıcılarla paylaşabildiği internet tabanlı uygulamalardır (Alwagait ve diğ., 2015). Bu platformları müşterilerin ve işletmelerin birbirleriyle etkileşime girmelerine olanak tanıyarak, birlikte değer oluşturulmasına katkıda bulunmaktadır (Dessart, 2017). Sosyal medya genel olarak farklı deneyimleri kolaylaştırmak için bir hizmet sunsa da, mevcut araştırmalar; birlikte değer oluşturmanın her bir farklı platformda nasıl farklılık gösterebileceğini ve tüketicilerin bir işletme ile etkileşim kurmak isterken hangi platforma yönelebilecekleri tam olarak belirlenememiştir (Pelletier ve diğ., 2020).

Sosyal medya ortamı sadece boyut açısından değil, aynı zamanda işlevsellik açısından da farklılık gösteren zengin ve çeşitli platformlarla doludur (Kietzmann ve diğ., 2011). Youtube, Twitter, Facebook, Instagram vb. birçok platform olmasına rağmen, sosyal medya pazarlaması genellikle aynı sosyal medya iletişim diğer tüm sosyal medya platformlarında paylaşılmasını içeren ve çapraz paylaşım olarak da tanımlanan "herkese uyan tek beden" bir yaklaşım olarak görülmektedir. Bu uygulama çoğu sosyal medya uygulayıcısı tarafından önerilmemektedir (Cyca, 2018); ayrıca, tüketicilerin her bir platformdan gerçekten ne istediğini ve işletmelerin müşteri değeri sunmak için her bir platformun hazırladıkları reklam içeriğini nasıl optimize edebileceğini net bir şekilde belirtmemektedir (Pelletier ve diğ., 2020).

Dünya genelinde insanların iletişim kurmasına ve deneyimlerini paylaşmasına olanak tanıyan Youtube, Facebook, Twitter, Instagram, LinkedIn, Snapchat gibi çok sayıda sosyal medya kanalı bulunmaktadır. Fiziksel mesafelerden bağımsız olarak, milyarlarca insan bu sosyal medya kanalları üzerinden iletişim kurmaktadır. 2019'un başlarında, dünya nüfusunun toplamda %48'ini temsil eden 3.7 milyar aktif sosyal medya kullanıcısı bulunmakta ve bunların arasında 3.6 milyar kişi sosyal medyaya mobil cihazları aracılığıyla erişim sağlamaktadır (Kemp, 2019). Böylece, sosyal medyanın dünya genelindeki popülaritesi ve işletmelerin bu sosyal medya platformlarını reklamları için kullanma potansiyeli artmaktadır.

Çevrimiçi reklamlar 1990'ların başında, web sitesi sahibi işletmelerin içeriklerini desteklemek amacıyla ve ek gelir kaynakları aramasıyla ortaya çıkmıştır. Başlangıçta, reklamların birçoğu, belirli bir zaman aralığına göre gösterilen, daha sonra içeriğin gösterimi başına fiyatlandırılan banner reklamlardan oluşuyordu. 1990'ların sonunda, arama motorlarının popülaritesinin artmasıyla birlikte, arama tabanlı reklamcılık daha fazla önem kazanmaya başladı ve Google'ın AdWords arama reklamcılığı programı 2000 yılında tanıtıldı (Jansen & Mullen, 2008). Sosyal medya reklamcılığı ise, Facebook'un ilk reklamını yayınladığı 2006 yılında ortaya çıkmıştır (Bivens, 2017); 6 Kasım 2007'de Facebook, işletmeler ve işletmelerin hedeflediği kullanıcılar ile doğrudan bağlantı kurmasını sağlayan bir 'self-servis' reklam sistemi olarak Facebook reklamlarını tanıttı (Luzon ve diğ., 2022).

Günümüzde işletmeler tarafından kullanılan geleneksel medya reklamları, sosyal medya platformlarına kaymaktadır (Lee ve Hong, 2016). İşletmeler, reklam bütçelerinde daha fazla pay ayırmakta (Duffett, 2015) ve sosyal medya reklamlarına giderek daha fazla yatırım yapmaktadır (Chi, 2011). Sosyal medya reklamları, internet kaynaklı reklamlar olmasından dolayı müşteriler bu reklamlarla etkileşimlerde farklı algı ve deneyimlere sahip olabilmektedir. Bu durum, sosyal medya reklamlarının doğası gereği, müşterilerin reklamlarla daha fazla etkileşim kurmasını sağlayan kriterlerden kaynaklanmaktadır (Laroche ve diğ., 2013; Tuten ve Solomon, 2017). Söz konusu kriterler bu çalışma kapsamında aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

İçerik (K1): Sosyal medya kullanıcılarının bloglar, sosyal ağlar, wikiler ve sanal dünya dahil olmak üzere kolayca katılabildiği, paylaşabildiği ve içerik oluşturabildiği çevrimiçi bir medyadır.

Popülerlik (K2): Sosyal medya platformlarının ve işletmelerin bu platformlara reklam verme popülaritesinin artması, şirketler için yeni pazarlama fırsatları doğurmaktadır.

Analizler ve Raporlar (K3): Geleneksel pazarlama yöntemlerinin aksine, işletmelerin sosyal medyaya vermiş oldukları reklamların ölçülebilir ve raporlanabilir sonuçlarını sunmaktadır.

Maliyet (K4): Sosyal medya platformlarında, reklamların olabildiğince az maliyetle daha çok sayıda müşteriye ulaşmak hedeflenmektedir.

Hedef Kitle Uyumu (K5): Sosyal medya platformları aracılığıyla müşterilerine ulaşmak isteyen ya da reklam kampanyası yürütmek isteyen işletmeler, hedef kitlelerinin özelliklerini daha da netleştirerek çeşitli stratejiler belirleyebilmektedirler.

Kullanım Kolaylığı (K6): Sosyal medya kullanımının artan eğilimi ve internet teknolojisinin gelişimi, işletmeler için oldukça cesaret verici fırsatlar getirmekte olup, bu fırsatlar toplum tarafından sosyal medya platformlarının kolay kullanılmasıyla desteklenmektedir.

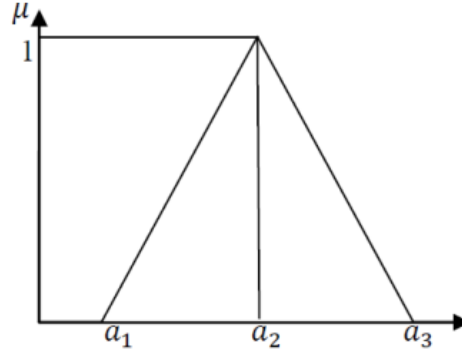
Uzman görüşleri ve literatürdeki çalışmalar doğrultusunda belirlenen yukarıdaki kriterler; söz konusu çalışmalarda kullanıldıysa "+", kullanılmadıysa "-" şeklinde Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Kriterler ve literatürdeki çalışmalar.

	Çalık (2020)	Enyinda ve diğ. (2018)	Sudipa (2020)	Yücenur ve diğ. (2022)	Tavana ve diğ. (2013)	Saçan ve Eren (2021)
K1	+	-	+	-	+	+
K2	+	-	-	+	-	+
K3	+	-	-	-	-	-
K4	+	-	-	+	+	+
K5	+	-	+	+	+	+
K6	+	-	+	-	+	-

### 3. Yöntem

Bu çalışmada önerilen G-FES, bulanık bir ÇKKV yaklaşımıdır. Bulanık ÇKKV yöntemleri, karar matrisinin elemanları bulanık sayı olduğunda kullanılır (Chu ve Lin, 2009). G-FES ise karar matrisinin elemanları sadece üçgensel bulanık sayılar iken kullanılabilir. ( $a_1, a_2, a_3$ ) üçgensel bulanık sayısının üyelik fonksiyonunun grafiği aşağıdaki gibidir (Ali ve diğ., 2016).



**Şekil 1.** Üçgensel bulanık sayının üyelik fonksiyonunun grafiği (Ali ve diğ., 2016).

G-FES ile birden çok uzmanın görüşü bir araya getirilir. Uzman görüşleri için dilbilimsel değişkenler ve karşılıkları, bu çalışmaya özgü olarak Tablo 2'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. Dilbilimsel Değişkenler.

Dilbilimsel Değişkenler	Karşılığı
Aşırı İyi	1
Çok İyi	0.75
İyi	0.5
Biraz İyi	0.25
Vasat	0
Biraz Kötü	-0.25
Kötü	-0.5
Çok Kötü	-0.75
Aşırı Kötü	-1

Bu çalışmada önerilen G-FES'in adımları aşağıdaki gibidir.

**Adım 1:** Tablo 2'de verilen dilbilimsel değişkenler kullanılarak uzmanların tüm alternatifler için tüm kriterler bazında görüşü alınır.

**Adım 2:** Uzman görüşlerinin minimumu  $a_1$ , medyanı  $a_2$  ve maksimumu  $a_3$  olarak atanarak ilgili kriter bazında ilgili alternatifin bulanık faydası ( $a_1, a_2, a_3$ ) olarak belirlenir. Bunlar bir araya getirildiğinde bulanık karar matrisi A oluşturulur.

Kriterlerin ağırlık vektörü,  $y$  sütun vektörü olsun. Bu vektörün elemanları 0 ile 1 arasındadır ve elemanlarının toplamı 1'dir. Buna göre alternatiflerin bulanık fayda vektörü ( $z$ ) aşağıdaki gibi bulunur.

$$z = Ay \quad (1)$$

Alternatiflerin ağırlık vektörü,  $x$  sütun vektörü olsun. Bunun da elemanları 0 ile 1 arasındadır ve elemanlarının toplamı 1'dir. Buna göre  $x$  vektörüne karşı gelen bulanık fayda ( $f$ ) aşağıdaki gibi bulunur. (Burada  $x^T$ ,  $x$  sütun vektörünün transpozudur.)

$$f = x^T z = x^T Ay \quad (2)$$

Bu çalışmada olduğu gibi ağırlık vektörünün elemanları negatif olmadığı ve üçgensel bulanık sayılar kullanıldığında  $E_B()$  ile gösterilen bulanık ortalama operatörü ve  $STD_B()$  ile gösterilen bulanık standart sapma operatörü, doğrusal operatörlerdir (Göktaş ve Duran, 2020). Buna ve (2)'ye göre bulanık fayda için bulanık ortalama ve standart sapma sırasıyla aşağıdaki gibi bulunur. Burada A ile verilen bulanık karar matrisinin bulanık ortalamasını gösteren matris  $E_B(A)$  ile, bulanık standart sapmasını gösteren matris  $STD_B(A)$  ile gösterilmiştir,  $m$  kriter sayısıdır,  $n$  alternatif sayısıdır ve A bulanık karar matrisinin  $i$ . satır  $j$ . sütun elemanı  $A_{ij}$  ile gösterilmiştir.

$$E_B(f) = E_B(x^T Ay) = E_B\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j A_{ij}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j E_B(A_{ij}) = x^T E_B(A) y \quad (3)$$

$$STD_B(f) = STD_B(x^T Ay) = STD_B\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j A_{ij}\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_i y_j STD_B(A_{ij}) = x^T STD_B(A) y$$

( $a_1, a_2, a_3$ ) ile verilen alternatifin kriter bazında bulanık faydası için bulanık ortalama ve standart sapma sırasıyla aşağıdaki gibi bulunur (Carlsson ve diğ., 2002). Bulanık standart sapmanın hesabında  $a_3$  yerine 1 kullanılmasının nedeni, bulanık standart sapmanın aşağı yönlü bir risk ölçüsüne benzer sonuç vermesini sağlamaktır.

$$E_B((a_1, a_2, a_3)) = \frac{a_1 + 4a_2 + a_3}{6} \quad (4)$$

$$STD_B((a_1, a_2, 1)) = \frac{1 - a_1}{2\sqrt{6}}$$

**Adım 3 (a):** (4)'teki bilgiler yardımıyla  $E_B(A)$  matrisi oluşturulur.  $E_B(A)$  bulunurken, A bulanık karar matrisinin her bir elemanı için bulanık ortalama değeri ayrı ayrı bulunur ve karşı gelen matrisin aynı elemanı olarak atanır.



**Adım 3 (b):** (4)'teki bilgiler yardımıyla  $STD_B(A)$  matrisi oluşturulur.  $STD_B(A)$  bulunurken, A bulanık karar matrisinin her bir elemanı için bulanık standart sapma değeri ayrı ayrı bulunur ve karşı gelen matrisin aynı elemanı olarak atanır.

(3)'te verilen fonksiyonlar, herhangi bir  $y$  vektörü için  $x$  vektörünün doğrusal fonksiyonlardır. Karar vericinin birinci (ikinci) amacı (3)'teki bulanık ortalamayı (standart sapmayı) maksimize (minimize) etmek olsun. Ağırlıklı amaç metoduna göre  $x$  vektörünün aşağıdaki doğrusal fonksiyonu maksimize edilmelidir. Burada  $w$  değeri birinci amacın ağırlığıdır ve karar vericinin risk algısına bağlıdır. Riskten kaçınma derecesi en yüksek karar verici için  $w$  değeri 0 olarak alınır. Risk nötr karar verici içinse  $w$  değeri 1 olarak alınır. Karar vericinin risk sever olmadığı varsayılmıştır.

$$wE_B(f) + (1-w)(-1)STD_B(f) = w[x^T E_B(A)y] + (1-w)[-x^T STD_B(A)y] = x^T [wE_B(A) - (1-w)STD_B(A)]y \quad (5)$$

Ödemeler matrisi (C) aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Buna göre (5)'teki ağırlıklı amaç fonksiyonu,  $x^T Cy$  ifadesine indirgenir.

$$C := wE_B(A) - (1-w)STD_B(A) \quad (6)$$

**Adım 4:** Belirlenen  $w \in [0,1]$  değeri için C ödemeler matrisi (6)'daki gibi oluşturulur.

**Uyarı:** (4)'te verilen bulanık ortalama, Çalık'ın (2020) kullandığı durulama (defuzzification) metodu ile aynı sonucu vermektedir. Bu çalışmanın söz konusu çalışmadan farkı ve iddia edilen en önemli üstünlüğü, durulama sırasında kaybedilen bilgiyi en aza indirmek için bulanık ortalama ile birlikte bulanık standart sapmanın da kullanılmasıdır. Diğer iddia edilen üstünlükler; kriterlerin olası tüm ağırlıklarını dikkate aldığından daha dayanıklı bir yaklaşım olması ve karar vericinin kişisel özelliklerine bağlı olan riskten kaçınma derecesini dikkate almasıdır. Söz konusu çalışmada kullanılan bulanık VIKOR yöntemi, kriterlerin farklı ağırlık vektörleri için alternatiflerin öncelik sıralamalarını farklı bulmaktadır.

G-FES, kriterlerin tüm olası ağırlıkları dikkate alır. Kriterlerin tüm olası ağırlıklarını gösteren küme aşağıdaki gibidir. Burada  $m$  kriter sayısıdır.

$$S_1 = \left\{ y : \sum_{j=1}^m y_j = 1 \text{ ve } y_j \geq 0 \right\} \quad (7)$$

Sürekli ÇKKV probleminin uygun çözüm kümesi için ise aşağıdaki bilgi geçerlidir. Burada  $n$  alternatif sayısıdır.

$$S_2 = \left\{ x : \sum_{i=1}^n x_i = 1 \text{ ve } x_i \geq 0 \right\} \quad (8)$$

Söz konusu bilgiler doğrultusunda aşağıdaki maksimin en iyileme problemi oluşturulmuştur. Buradaki amaç fonksiyonu,  $x^T Cy$  ile verilen ve (5)'teki ifadelerle özdeş olan ağırlıklı amaç fonksiyonudur. G-FES ile bulunan alternatiflerin öncelik vektörü ( $x^*$ ), bu problemin  $x$  vektörü için en iyi çözümü olarak tanımlanmıştır. Buna göre G-FES herhangi bir  $x$  vektörü için kriterlerin, en düşük ödemeye karşı gelen ağırlık vektörünü dikkate alır.

$$\text{maks} \min_{x \in S_2, y \in S_1} x^T Cy \quad (9a)$$

(9a), C ödemeler matrisi ile temsil edilen iki oyunculu sıfır toplamlı oyunun satır oyuncusu (karar verici) için çözümünü verir. Burada sütun oyuncusu doğadır. Alternatifler saf stratejiler iken, diğer kaynak dağıtım planları karma stratejilerdir. C matrisinin sütunları ise doğanın stratejilerine karşı gelmektedir. C matrisinin  $i$ . satır  $j$ . sütun elemanı  $C_{ij}$  ile gösterilsin. Oyun teorisinden bilindiği üzere (9a) ve aşağıda verilen doğrusal en iyileme problemi özdeştir (Chen ve Larbani, 2006; Raghavan, 1994; Sikalo ve diğ., 2022). (9b)'nin çözümünde Simpleks algoritması kullanılabilir. (9b)'nin en iyi çözümü tek değilse sonlu sayıda köşesi olan konveks ve kompakt bir bölge tüm en iyi çözümleri verir (Raghavan, 1994). Bu çalışmada (9b)'nin en iyi çözümünün tek olduğu varsayılmıştır.

maks  $t$

$$\text{öyle ki } \sum_{i=1}^n C_{ij} x_i \geq t, \text{ her } j \text{ için}$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

$$x_i \geq 0, \text{ her } i \text{ için}$$

(9b)

**Adım 5:** (9b)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek alternatiflerin öncelik vektörü ( $x^*$ ) bulunur. (Alternatif en iyi çözümler varsa tüm çözümleri veren bölgenin tüm köşelerinin ortalaması  $x^*$  olarak alınabilir.)

**Adım 6:** Sürekli ÇKKV problemleri için  $x^*$  vektörü en iyi kaynak dağıtım planıdır. Kesikli ÇKKV problemleri için ise en yüksek önceliğe sahip olan alternatif seçilir.

(9b)'deki doğrusal en iyileme probleminin dual problemi aşağıdaki gibidir. Bu problemin çözümü olan  $y^*$  vektörü sütun oyuncusu (doğa) için en iyi stratejidir. (9b) ve (10) problemlerinin en iyi sonucu ( $t^*$ ) birbirlerine eşittir ve oyun değeri olarak adlandırılır (Chen ve Larbani, 2006; Raghavan, 1994).  $x^*$  ve  $y^*$  vektörleri sırasıyla alternatiflerin ve kriterlerin, Nash dengesindeki ağırlık vektörleridir. Söz konusu vektörler, (3)'te yerine yazıldığında sırasıyla Nash dengesindeki bulanık ortalama ve standart sapma değerleri bulunur. Nash dengesinde, her oyuncunun diğer oyuncuların denge stratejilerini bildiği varsayılır ve hiçbir oyuncunun yalnızca kendi stratejisini değiştirerek kazanacağı bir şey yoktur (Haugen ve Nilsen, 2009).

min  $t$

$$\text{öyle ki } \sum_{j=1}^m C_{ij} y_j \leq t, \text{ her } i \text{ için}$$

$$\sum_{j=1}^m y_j = 1$$

$$y_j \geq 0, \text{ her } j \text{ için}$$

(10)

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde Konya'da elektronik alanında uzun süredir faaliyet gösteren bir işletme için sosyal medya platformu seçimi problemi incelenmiştir. Şirketin hali hazırda sosyal medya reklamları bulunmamakla birlikte özellikle genç tüketicilere yönelik sosyal medya reklam stratejisi oluşturma çabası bulunmaktadır. Şirketin reklam içerik tercihi daha çok metinler ve görsellerdir. Bu bölümde söz konusu gerçek dünya probleminin çözümü için Bölüm 3'te tanıtılan G-FES kullanılmıştır.

**Adım 1:** Yedi farklı uzmanın görüşleri, Tablo 2'deki dilbilimsel değişkenler aracılığıyla alınmıştır. Buradaki kriterler içerik (K1), popülerlik (K2), analizler ve raporlar (K3), maliyet (K4), hedef kitle uyumu (K5) ve kullanım kolaylığı (K6) olarak sıralanabilir. Söz konusu uzmanların tümü pazarlama alanında çalışmakta olup, bunlardan üçü Karabük Üniversitesinde öğretim üyesidir, ikisi Uşak Üniversitesinde öğretim üyesidir ve ikisi özel sektör çalışanıdır. Örnek olması amacıyla birinci uzmanın görüşleri Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Birinci uzmanın görüşleri.

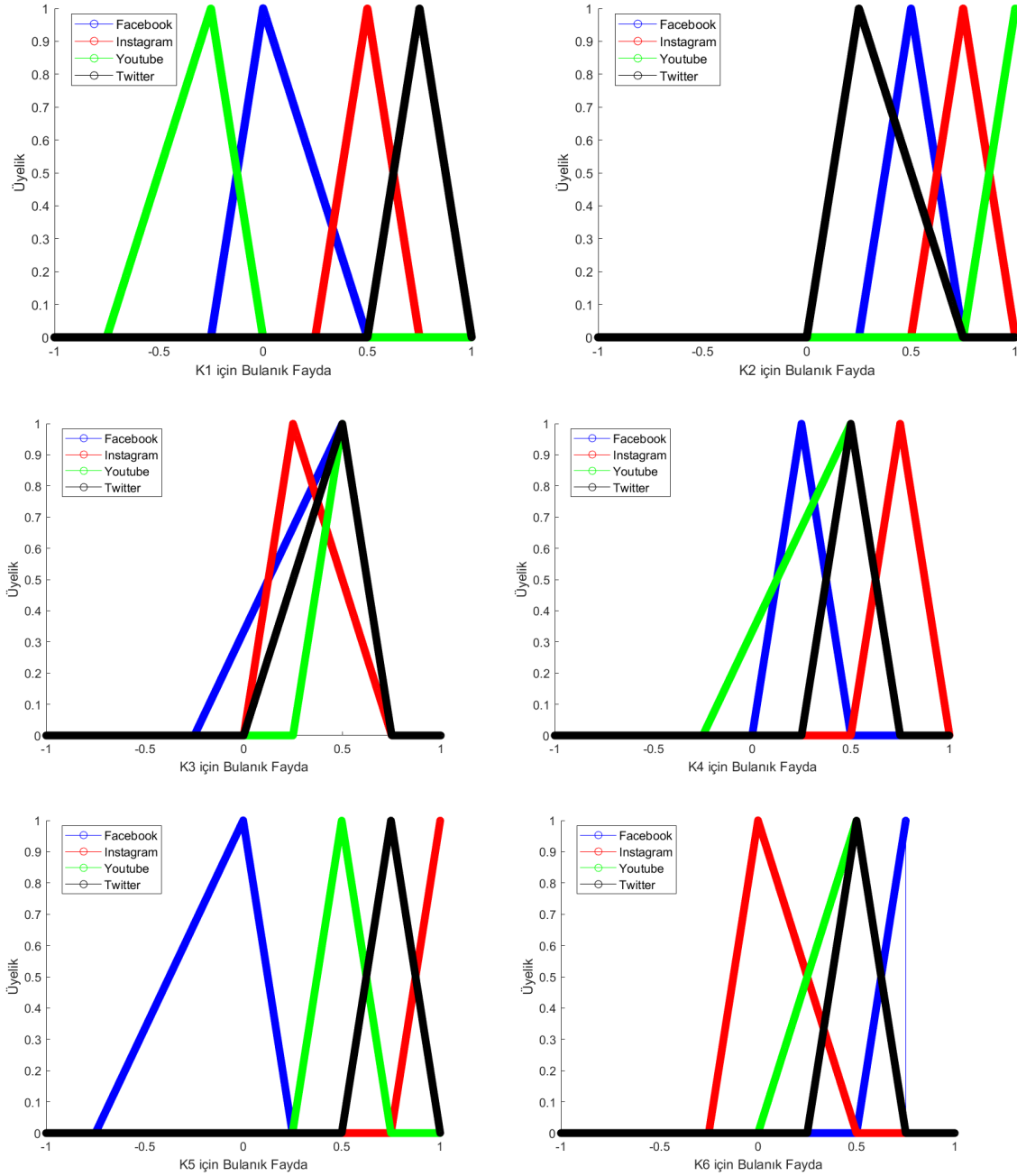
	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Facebook	Biraz iyi	Biraz iyi	Çok iyi	Vasat	Kötü	İyi
Instagram	İyi	İyi	İyi	Aşırı iyi	Aşırı iyi	Vasat
Youtube	Kötü	Çok iyi	Biraz iyi	Vasat	Biraz iyi	Çok iyi
Twitter	Çok iyi	Biraz iyi	Biraz iyi	İyi	İyi	Çok iyi

**Adım 2:** Uzman görüşleri ve Tablo 2'deki bilgiler kullanılarak, her bir alternatifin bulanık faydası için üçgensel bulanık sayılar belirlenmiş ve bulanık karar matrisi (A) Tablo 4'teki gibi oluşturulmuştur. Örneğin, Facebook alternatifi için içerik (K1) kriteri bazında uzman görüşlerinin minimumu "biraz kötü" dilbilimsel değişkeni, medyayı "vasat" dilbilimsel değişkeni, maksimumu "iyi" dilbilimsel değişkenidir.

Tablo 4. Bulanık karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Facebook	(-0.25, 0, 0.5)	(0.25, 0.5, 0.75)	(-0.25, 0.5, 0.75)	(0, 0.25, 0.5)	(-0.75, 0, 0.25)	(0.5, 0.75, 0.75)
Instagram	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.5, 0.75, 1)	(0, 0.25, 0.75)	(0.5, 0.75, 1)	(0.75, 1, 1)	(-0.25, 0, 0.5)
Youtube	(-0.75, -0.25, 0)	(0.75, 1, 1)	(0.25, 0.5, 0.75)	(-0.25, 0.5, 0.75)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0, 0.5, 0.75)
Twitter	(0.5, 0.75, 1)	(0, 0.25, 0.75)	(0, 0.5, 0.75)	(0.25, 0.5, 0.75)	(0.5, 0.75, 1)	(0.25, 0.5, 0.75)

Tablo 4’te verilen bilgiler doğrultusunda, farklı kriterler için alternatiflerin bulanık faydaları sırasıyla Şekil 2’de gösterilmiştir. Burada Facebook mavi renk ile, Instagram kırmızı renk ile, Youtube yeşil renk ile, Twitter siyah renk ile gösterilmiştir.



Şekil 2: Kriterler için alternatiflerin bulanık faydaları.

**Adım 3 (a):** (4) ve Tablo 4’teki bilgiler doğrultusunda, bulanık fayda için bulanık ortalama matrisi ( $E_B(A)$ ) Tablo 5’teki gibi oluşturulmuştur.

**Tablo 5.** Bulanık ortalama matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Facebook	0.0417	0.5	0.4167	0.25	-0.0833	0.7083
Instagram	0.5	0.75	0.2917	0.75	0.9583	0.0417
Youtube	-0.2917	0.9583	0.5	0.4167	0.5	0.4583
Twitter	0.75	0.2917	0.4583	0.5	0.75	0.5

**Adım 3 (b):** (4) ve Tablo 4'teki bilgiler doğrultusunda, bulanık fayda için bulanık standart sapma matrisi ( $STD_B(A)$ ) Tablo 6'daki gibi oluşturulmuştur.

**Tablo 6.** Bulanık standart sapma matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Facebook	0.2552	0.1531	0.2552	0.2041	0.3572	0.1021
Instagram	0.1531	0.1021	0.2041	0.1021	0.0510	0.2552
Youtube	0.3572	0.0510	0.1531	0.2552	0.1531	0.2041
Twitter	0.1021	0.2041	0.2041	0.1531	0.1021	0.1531

**Adım 4: i)** (6)'ya göre  $w=1$  iken ödemeler matrisi (C) Tablo 5'te verilen  $E_B(A)$  matrisine eşittir.

**ii)** (6)'ya göre  $w=0$  iken  $C=(-1)*STD_B(A)$  olarak bulunur.  $STD_B(A)$  matrisi Tablo 6'da verilmiştir.

**iii)** (6)'ya göre  $w=0.5$  iken yani iki amacın ağırlıkları eşitken ödemeler matrisi Tablo 7'deki gibi oluşturulmuştur.

**Tablo 7.**  $w=0.5$  için ödemeler matrisi (C).

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
Facebook	-0.1067	0.1735	0.0808	0.0229	-0.2203	0.3031
Instagram	0.1735	0.3240	0.0438	0.3240	0.4537	-0.1067
Youtube	-0.3244	0.4537	0.1735	0.0808	0.1735	0.1271
Twitter	0.3240	0.0438	0.1271	0.1735	0.3240	0.1735

**Adım 5:** (9b)'de verilen doğrusal en iyileme problemi  $w=0$ ,  $w=0.5$  ve  $w=1$  için bulunan C ödemeler matrisleri için ayrı ayrı çözüldüğünde alternatiflerin öncelik vektörleri Tablo 8'deki gibi tek olarak elde edilmiştir.

**Tablo 8.** Alternatiflerin öncelik vektörleri.

	w=0	w=0.5	w=1
Facebook	0	0	0
Instagram	0	0	0
Youtube	0.333	0.283	0.269
Twitter	0.667	0.717	0.731

**Adım 6:** Tablo 8'e göre aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- $w=0.5$  yani riskten kaçınma derecesi orta düzey olan karar verici için sosyal medya reklam bütçesinin %28.3'ü Youtube, %71.7'si Twitter platformlarına ayrılmalıdır.
- $w=1$  yani risk nötr karar verici için sosyal medya reklam bütçesinin %26.9'u Youtube, %73.1'i Twitter platformlarına ayrılmalıdır.
- Riskten kaçınma derecesi en yüksek olan karar verici yani  $w=0$  için sosyal medya reklam bütçesinin %33.3'ü Youtube, %66.7'si Twitter platformlarına ayrılmalıdır.
- Riskten kaçınma derecesi arttıkça dağıtım planı dengeli bir hal almaktadır.

Farklı C ödemeler matrisleri için (10)'daki doğrusal en iyileme problemi çözüldüğünde,  $y^*$  vektörleri Tablo 9'daki gibi tek olarak elde edilmiştir. Buradaki  $y^*$  vektörleri kriterlerin, Nash dengesindeki ağırlık vektörleridir ve Tablo 6'da verilen  $x^*$  vektörlerine karşı gelmektedir. Başka bir deyişle en iyi kaynak dağıtım planı için kriterlerin, en düşük ödemeye karşı gelen ağırlık vektörüdür. Görüldüğü üzere tüm durumlarda analizler ve raporlar (K3) ile içerik (K1) kriterleri Nash dengesinde pozitif ağırlığa sahip olan kriterlerdir. Diğer kriterlerin ağırlıklarıysa Nash dengesinde sıfıra eşittir. Riskten kaçınma derecesi arttıkça K1'in (K3'ün) ağırlığı artmaktadır (azalmaktadır).

**Tablo 9.** Kriterlerin, Nash dengesindeki ağırlık vektörleri.

	w=0	w=0.5	w=1
K1	0.167	0.067	0.038
K2	0	0	0
K3	0.833	0.933	0.962
K4	0	0	0
K5	0	0	0
K6	0	0	0

Sosyal medya platformu seçimi problemi için yapılan literatürdeki çalışmalar birbirleriyle karşılaştırıldığında, farklı çalışmalarda farklı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu durumun nedenleri; çalışmalarda farklı yöntemler kullanılması, farklı uzmanların farklı görüşlerinin olması ve farklı şirketler için farklı önceliklerin bulunması olarak sıralanabilir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar da literatürdeki sonuçlardan farklılık göstermektedir. Bu çalışmada ayrıca karar vericinin farklı kişisel özelliklere bağlı olarak farklı sonuçlar elde edilmiştir.

## 5. Sonuçlar

Sosyal medya reklamları bilgi ve teknoloji çağının hızla büyüyen bir gerçeğidir. Bu çalışmada bir gerçek dünya problemi için sosyal medya reklam platformu seçimi incelenmiştir. Yapılan uygulamada herhangi bir riskten kaçınma derecesi (w) için Twitter platformuna birinci sırada, Youtube platformuna ikinci sırada kaynak ayrılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Facebook ile Instagram platformlarına herhangi bir kaynak ayrılmaması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte karar vericinin farklı riskten kaçınma dereceleri için kaynak dağıtım planları farklılık göstermektedir. Öte yandan burada elde edilen sonuçlar ilgili şirket ve uzmanlar özelinde olup genelleştirilemez. Buna karşın bu çalışmada önerilen yaklaşım, ÇKKV problemi olarak formalize edilebilecek herhangi bir işletme probleminin çözümünde kolaylıkla kullanılabilir. Önerilen yaklaşımın farklı görüşleri bir araya getirmesi, verilecek kararların doğruluğunu artırabilir. Söz konusu yaklaşımla elde edilen sonuçların pratikteki faydasının, uzman bilgisinin kalitesiyle doğru orantılı olması beklenmektedir.

Sosyal medya platformu seçimi ÇKKV problemidir. Söz konusu problemler için bu çalışmada önerilen G-FES yaklaşımının belli başlı güçlü yanları; doğrusal programlama ile çözülebildiğinden kullanım kolaylığı olması, bulanık ortalama ve standart sapmayı birlikte dikkate aldığından bulanık karar matrisindeki bilgiyi yüksek oranda koruması, kriterlerin tüm olası ağırlıklarını dikkate aldığından dayanıklı bir yaklaşım olması ve karar vericinin riskten kaçınma derecesini dikkate alması olarak sıralanabilir. Öte yandan G-FES yaklaşımı bulanık karar matrisinin elemanları sadece üçgensel bulanık sayılarken kullanılabilir. Bu da önemli bir sınırlılık oluşturmaktadır. Ayrıca riskten kaçınma derecesinin belirlenmesi ve farklı Nash dengeleri olması durumunda alternatiflerin öncelik vektörünün belirlenmesi konuları G-FES'in objektifliğini kısmen azaltmaktadır. İlerideki çalışmalarda, G-FES yaklaşımında uygulanan metodoloji iki oyunculu sıfır toplamlı bulanık oyunlara uygulanabilir. Bununla birlikte ilerideki çalışmalarda G-FES, sosyal medya reklam platformu seçiminden farklı ÇKKV problemleri için kullanılabilir.

### Araştırmacıların Katkısı

Araştırmannın yazarları araştırmanın tüm süreçlerine eşit derecede katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

Ali, M. Y., Sultana, A., & Khan, A. F. M. K. (2016). Comparison of fuzzy multiplication operation on triangular fuzzy number. *IOSR Journal of Mathematics*, 12(4-1), 35-41. <http://dx.doi.org/10.9790/5728-1204013541>

Alwagait, E., Shahzad, B., & Alim, S. (2015). Impact of social media usage on students academic performance in Saudi Arabia. *Computers in Human Behavior*, 51, 1092-1097. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.09.028>

Berry, S. (2021). How to Set a Smart Social Advertising Budget for 2021. Accessed on 7 March 2023 from <https://www.webfx.com/blog/social-media/how-to-set-social-advertising-budget/>.

- Bigné, J. E. (1995). Advertising budget practices: A review. *Journal of Current Issues & Research in Advertising*, 17(2), 17-31. <https://doi.org/10.1080/10641734.1995.10505030>
- Bivens, R. (2017). The gender binary will not be deprogrammed: Ten years of coding gender on Facebook. *New Media & Society*, 19(6), 880-898. <https://doi.org/10.1177/1461444815621527>
- Bruhn, M., Schoenmueller, V., & Schäfer, D. B. (2012). Are social media replacing traditional media in terms of brand equity creation?. *Management Research Review*, 35(9), 770-790. <https://doi.org/10.1108/01409171211255948>
- Carlsson, C., Fullér, R., & Majlender, P. (2002). A possibilistic approach to selecting portfolios with highest utility score. *Fuzzy Sets and Systems*, 131(1), 13-21.
- Chen, Y. W., & Larbani, M. (2006). Two-person zero-sum game approach for fuzzy multiple attribute decision making problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(1), 34-51. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.06.004>
- Chi, H. H. (2011). Interactive digital advertising vs. virtual brand community: Exploratory study of user motivation and social media marketing responses in Taiwan. *Journal of interactive advertising*, 12(1), 44-61. <https://doi.org/10.1080/15252019.2011.10722190>
- Chu, T. C. & Lin, Y. (2009). An extension to fuzzy MCDM. *Computers & Mathematics with Applications*, 57(3), 445-454. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2008.10.076>
- Cyca, M. (2018). Stop posting the same message on social media and do this instead. Accessed on 6 February 2023 from <https://blog.hootsuite.com/cross-promote-social-media/>.
- Çalık, A. (2020). Evaluation of social media platforms using best-worst method and fuzzy VIKOR methods: A case study of travel agency. *Iranian Journal of Management Studies*, 13(4), 645-672. <https://doi.org/10.22059/ijms.2020.294545.673893>
- Dateportal (2023). Digital 2023: Global Overview Report. Accessed on 7 March 2023 from <https://datareportal.com/reports/digital-2023-global-overview-report>.
- Dessart, L. (2017). Social media engagement: a model of antecedents and relational outcomes. *Journal of Marketing Management*, 33(5-6), 375-399. <https://doi.org/10.1080/0267257X.2017.1302975>
- Duffett, R. G. (2015). Facebook advertising's influence on intention-to-purchase and purchase amongst Millennials. *Internet Research*, 25(4), 498-526. <https://doi.org/10.1108/IntR-01-2014-0020>
- Enyinda, C. I., Ogbuehi, A. O., & Mbah, C. H. (2018). Building pharmaceutical relationship marketing and social media impact: An empirical analysis. *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing*, 12(2), 198-230. <https://doi.org/10.1108/IJPHM-02-2017-0007>
- Erkan, I., & Evans, C. (2016). The influence of eWOM in social media on consumers' purchase intentions: An extended approach to information adoption. *Computers in Human Behavior*, 61, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.003>
- Göktaş, F. ve Duran, A. (2020). Olabilirlik ortalama-varyans modelinin matematiksel analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1), 80-91. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.677022>
- Haugen, I. N., & Nilsen, A. S. (2009). *Game theory: strategies, equilibria, and theorems*. Nova.
- Hawkins, K., & Vel, P. (2013). Attitudinal loyalty, behavioural loyalty and social media: An introspection. *The Marketing Review*, 13(2), 125-141. <https://doi.org/10.1362/146934713X13699019904605>
- Iankova, S., Davies, I., Archer-Brown, C., Marder, B., & Yau, A. (2019). A comparison of social media marketing between B2B, B2C and mixed business models. *Industrial Marketing Management*, 81, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.01.001>

- Ismail, A. R. (2017). The influence of perceived social media marketing activities on brand loyalty: The mediation effect of brand and value consciousness. *Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics*, 29(1), 129-144. <http://dx.doi.org/10.1108/APJML-10-2015-0154>
- Jansen, B. J., & Mullen, T. (2008). Sponsored search: an overview of the concept, history, and technology. *International Journal of Electronic Business*, 6(2), 114-131. <https://doi.org/10.1504/IJEB.2008.018068>
- Jacobson, J., Gruzd, A., & Hernández-García, Á. (2020). Social media marketing: Who is watching the watchers?. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 53, 101774. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.03.001>
- Kaplan, A. M., & Haenlein, M. (2010). Users of the world, unite! The challenges and opportunities of Social Media. *Business Horizons*, 53(1), 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2009.09.003>
- Kemp, S. (2019). Digital 2019: Q4 Global digital statshot. Accessed on 7 March 2023 from <https://datareportal.com/reports/digital-2019-q4-global-digital-statshot>.
- Kietzmann, J. H., Hermkens, K., McCarthy, I. P., & Silvestre, B. S. (2011). Social media? Get serious! Understanding the functional building blocks of social media. *Business Horizons*, 54(3), 241-251. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.01.005>
- Kumar, V., Khan, I., Fatma, M., & Singh, A. (2022). Engaging luxury brand consumers on social media. *Journal of Consumer Marketing*, 39(1), 121-132. <https://doi.org/10.1108/JCM-10-2020-4175>
- Laroche, M., Habibi, M. R., & Richard, M. O. (2013). To be or not to be in social media: How brand loyalty is affected by social media?. *International Journal of Information Management*, 33(1), 76-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2012.07.003>
- Lee, D., Hosanagar, K., & Nair, H. S. (2018). Advertising content and consumer engagement on social media: Evidence from Facebook. *Management Science*, 64(11), 5105-5131. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2902>
- Lee, J., & Hong, I. B. (2016). Predicting positive user responses to social media advertising: The roles of emotional appeal, informativeness, and creativity. *International Journal of Information Management*, 36(3), 360-373. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.01.001>
- Luzon, Y., Pinchover, R., & Khmelnitsky, E. (2022). Dynamic budget allocation for social media advertising campaigns: optimization and learning. *European Journal of Operational Research*, 299(1), 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.08.019>
- Market Research Report (2023). Social Media Management Market to Witness Huge Growth by Key. Accessed on 7 March 2023 from <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/social-media-management-market-321810.html>.
- Mizik, N., & Jacobson, R. (2003). The financial implications of shifts in and value appropriation. *Journal of Marketing*, 67(1), 63-76. <https://doi.org/10.1509/jmkg.67.1.63.18595>
- Nerlove, M., & Arrow, K. J. (1962). Optimal advertising policy under dynamic conditions. *Economica*, 129-142. <https://doi.org/10.2307/2551549>
- Haugen, I. N., & Nilsen, A. S. (2009). *Game theory: strategies, equilibria, and theorems*. Nova.
- Nyagadza, B. (2020). Search engine marketing and social media marketing predictive trends. *Journal of Digital Media & Policy*, 13(3), 407-425. [https://doi.org/10.1386/jdmp\\_00036\\_1](https://doi.org/10.1386/jdmp_00036_1)
- Okazaki, S. (2015). From the editor. *Journal of Advertising*, 44(4), 297-299. <https://doi.org/10.1080/00913367.2015.1092737>
- Pelletier, M. J., Krallman, A., Adams, F. G., & Hancock, T. (2020). One size doesn't fit all: a uses and gratifications analysis of social media platforms. *Journal of Research in Interactive Marketing*, 14(2), 269-284. <https://doi.org/10.1108/JRIM-10-2019-0159>

- Raghavan, T. E. S. (1994). Zero-sum two-person games. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, 2, 735-768. [https://doi.org/10.1016/S1574-0005\(05\)80052-9](https://doi.org/10.1016/S1574-0005(05)80052-9)
- Saçan, B. C. ve Tamer, E. R. E. N. (2021). Sosyal medya reklam platformu seçimi: çok ölçütlü karar verme yöntemleri ile bir uygulama. *Journal of Turkish Operations Management*, 5(2), 721-738. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jtom/issue/67597/913230>
- Sikalo, M., Arnaut-Berilo, A. & Zaimovic, A. (2022). Efficient asset allocation: application of game theory-based model for superior performance. *International Journal of Financial Studies*, 10(1), 20. <https://doi.org/10.3390/ijfs10010020>
- Stefko, R., Bacik, R., & Fedorko, R. (2013). Spendings on social media as part of marketing budgets. *Polish Journal of Management Studies*, 8, 243-250. <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-8dc42c71-c77e-4af2-95a4-25dae2df6cb1#>
- Straker, K., Wrigley, C., & Rosemann, M. (2015). Typologies and touchpoints: designing multi-channel digital strategies. *Journal of Research in Interactive Marketing*, 9(2), 110-128. <https://doi.org/10.1108/JRIM-06-2014-0039>
- Sudipa, I. G. I., Astria, C., Irnanda, K. F., Windarto, A. P., Daulay, N. K., Suharso, W., & Wijaya, H. O. L. (2020). Application of MCDM using PROMETHEE II Technique in the Case of Social Media Selection for Online Businesses. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 835, No. 1, p. 012059). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/835/1/012059>
- Tavana, M., Momeni, E., Rezaeiniya, N., Mirhedayatian, S. M., & Rezaeiniya, H. (2013). A novel hybrid social media platform selection model using fuzzy ANP and COPRAS-G. *Expert Systems with Applications*, 40(14), 5694-5702. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.015>
- Tuten, T. L., & Solomon, M. R. (2017). *Social media marketing*. Sage.
- Vidale, M. L., & Wolfe, H. (1957). An operations-research study of sales response to advertising. *Operations Research*, 5(3), 370-381. <https://doi.org/10.1287/opre.5.3.370>
- Yücenur, G. N., Bozyel, K., & Ahmetoglu, A. (2022). Investigation the Effects of Different Social Media Platforms to Companies' Sales Marketing Processes by Multi-Criteria Decision Making Method. *International Journal of Marketing, Communication and New Media*, 10(18), 133-150. <https://doi.org/10.54663/2182-9306>





# Journal of Turkish Operations Management

## Nesnelerin interneti, uygulama alanları ve iş sağlığı ve güvenliği ile etkileşimi

Merve Erol<sup>1\*</sup>, Ergün Eraslan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

e-mail: merveerol@aybu.edu.tr ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-9261-8611>

<sup>2</sup> Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE

e-mail: ergunerlaslan@gmail.com ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5667-0391>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

### Özet

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 01.03.2023  
Revize: 24.09.2023  
Kabul: 05.12.2023

#### Anahtar Kelimeler:

İş Sağlığı ve Güvenliği,  
Nesnelerin İnterneti,  
Endüstri 4.0,  
Dijital Dönüşüm.

Nesnelerin interneti (Nİ); birbiri ile ilişkisi olan bilgisayarlar, dijital aygıtlar, mekanik nesnelere ya da benzersiz tanımlayıcılarla sağlanan, insana gerek duymadan ağ üzerinden veri aktarımı yapabilen sistemlerin tamamını açıklamak amacıyla kullanılan bir endüstri 4.0 teknoloji bileşenidir. Her gün artan bir biçimde, farklı endüstrilerde bulunan firma ve tedarik zinciri; daha verimli çalışabilmek, müşterilerine daha iyi bir hizmet sunabilmek, iş sonuçlarını geliştirebilmek, ve karar verme sürecini iyileştirmek için Nİ teknolojilerinden yararlanmaktadır. Buna ek olarak Nİ'nin, üretim ve hizmet organizasyonlarının iş sağlığı ve güvenliği sistem performanslarının iyileştirilmesinde kullanıldığına ilişkin çok sayıda araştırma yayımlanmıştır. Nİ'nin iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanımı konusunda yayımlanan çalışmalar, Nİ'nin iş sağlığı ve güvenliği alanının belli sorunlarına nasıl cevap verdiğine ilişkin olarak hazırlanmış ve önerilen teknoloji mimarileri tartışılmıştır. Bu makalede ise Nİ teknolojisi tartışılarak Nİ'nin iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanılabilir potansiyeli örnek araştırmalar incelenerek ortaya konulacak ve gelecek araştırma fırsatlarının neler olabileceği incelenecektir.

### Article Info

### Abstract

#### Article History:

Received: 01.03.2023  
Revised: 24.09.2023  
Accepted: 05.12.2023

#### Keywords:

Occupational health and Safety,  
Internet of Things,  
Industry 4.0,  
Digital Transformation.

Internet of Things (IoT); It is an industry 4.0 technology component used to describe all systems that can transfer data over the network without the need for humans, provided by computers, digital devices, mechanical objects or unique identifiers that are related to each other. Increasingly, companies in different industries and their supply chain; It uses IoT technology to work more efficiently, provide a better service to its customers, improve business results, and improve decision-making. In addition, numerous studies have been published on the use of IoT to improve the occupational health and safety system performance of manufacturing and service organizations. Published studies on the use of IoT in the field of occupational health and safety have been prepared on how IoT responds to certain problems in the field of occupational health and safety, and the proposed technology architectures are discussed. In this article, IoT technology will be discussed, and the potential of IoT to be used in the field of occupational health and safety will be revealed by examining sample studies and what future research opportunities may be.

## 1.Giriş

Teknoloji, Endüstri 4.0'ün bileşenlerinden biri olan Nesnelerin İnterneti (Nİ) aracılığıyla yeni bir döneme evrilmiş böylelikle farklı araçlar arasında işbirliği ve iletişim kurmayı mümkün kılan sistemlerin alt yapısı oluşturulmaya başlanmıştır. Bir başka deyişle, nesnelerin interneti sistemlerinin temel amacının, insan müdahalesi olmadan icra edilebilecek bilgi toplamaya ilişkin yetenekleri genişletmek olduğu ifade edilebilir (Niewolny, 2013). Nesnelerin İnterneti kavramının ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton tarafından tedarik zincirinde radyo frekansı tanımlama (RFID) teknolojisine bağlı nesnelere ilişkin küresel ağları ifade ederken kullanıldığı bilinmektedir (Ashton, 2009). Kavramın ilk defa dile getirildiği yıllardan günümüze kadar teknolojik ilerleme süreci giderek hızlanmış, nesnelerin interneti uygulama alanları ise bu gelişmelere koşut olarak genişlemesini sürdürmüştür. Örneğin, nesnelerin internetinin gerçek zamanlı veri elde etme özelliğinden yararlanarak, bir süredir tüm dünyayı sarsan COVID-19 pandemisi kaynaklı hastaların sağlık verilerini farklı veri tabanlarından elde etmek ve sanal yönetim sistemlerini kullanarak çözümler üretmek mümkündür (Stoessl ve diğ., 2020 ; Gupta, 2020 ; Javaid, 2020).

Nİ kavramının gelişimi; kablosuz teknolojilerin büyük ölçekli yayılımı, makineler arası etkileşim, bulut bilişim ve ileri ağ protokollerinin kullanım yaygınlığı ile yakından ilişkilidir. Diğer bir deyişle; nesnelerin interneti uygulamalarının dünyada yüksek oranda yayılımı, iletişim ağı çeşitliliğinin mümkün kıldığı, farklı yerlerde ve farklı zamanlarda, herhangi bir “şeyi/nesneyi” ya da insanı bir araya getirme özelliğine sahip olması ile söz konusu olmaktadır. Resmi belgelerde kendisine yer bulan “şey”; genellikle devre, nesne, cihaz ve aygıt gibi terimler yerine kullanılmakta ve günümüzde internete bağlı birçok unsur insan müdahalesi olmadan bağımsız bir biçimde çalışabilmektedir (Bagay, 2020).

Nİ'nin bu bütünlük çalışması özelliği, üretim ve hizmet sektörü tabanlı tedarik zinciri ve lojistik ağlarının etkinleştirilmesi ve sistem performansının; hız, esneklik, izlenebilirlik, görünürlük, işbirliği ve denetlenebilirlik açısından geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Nİ uygulamalarının ortaya koyduğu bu olumlu sonuçlara karşın; birlikte çalışabilirlik, maliyet ve güvenlik üzerinde durulması ve güçlendirilmesi gereken eksiklikler olarak dikkati çekmektedir. Güvenlik bağlamında; yeni cihazlar, yeni bağlantı türleri ve yeni veri türlerinin gelişmesiyle, kamu güvenliği-siber güvenlik, ağ bağlantıları ve veri paylaşımı risklerinin ortaya çıkacağı unutulmamalıdır. Genel olarak nesnelerin interneti tabanlı sistemlerin; harici siber tehditler, yetkisiz erişim vb. saldırılara karşı koyamayacakları ve standartlaştırılmış tek bir bilgi güvenliği sağlayamama riski ile karşı karşıya oldukları ifade edilebilir (NPSTC, 2019).

Nİ, üretim ve hizmet sektöründe yer alan tedarik zinciri operasyonlarının geliştirilmesinde yaygın kullanım alanı bulmakla birlikte, bu bütünlük uygulamaların, istihdam edilen beyaz ve mavi yakalı insan kaynağının sağlık ve güvenliğinin sağlanması sürecinde de etkin çözümler önerebilme potansiyeline sahip oldukları görülmektedir (Alam ve diğ., 2017; Gnoni 2020; Bavaresco, 2021; Zhang, 2022; Catarinucci, 2022; Zorzenon, 2022).

Günümüzde, halen birçok çalışanın iş kazaları nedeniyle iş göremez hale geldiği ve firmaların bu nedenle parasal kayıplara uğradığı gerçeğinden hareketle, bu katkının büyük önem taşıdığı ifade edilmelidir. Bu nedenle, nesnelerin interneti tabanlı dijital dönüşüm teknolojilerinin kullanımıyla, farklı endüstriler kapsamında hizmet veren iş yerlerinde oluşabilecek hataların, risklerin, kazaların ve diğer ölümcül vakaların önlenmesi hedeflenmektedir (Alam 2017 ve Zorzenon 2022).

Nİ'nin farklı tedarik zinciri uygulamalarını etkinleştirme ve sürdürülebilirliğe ilişkin performansı arttırabilme potansiyeli dikkate alındığında, bu teknolojilerin analiz edilmesi ve yeni araştırma fırsatlarına yer verilmesi büyük önem kazanmaktadır (Bavaresco ve diğ., 2021; Zhang, 2022; Catarinucci, 2022; Zorzenon, 2022). Bu nedenle makale; nesnelerin interneti, farklı uygulama alanları ve bilgi güvenliği üzerine bilgi vermeyi ve bu teknolojinin İş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki mevcut ve olası kullanım imkanlarını tartışmayı amaçlamaktadır.

Çalışmanın bundan sonraki bölümleri şu şekilde sıralanmıştır: ikinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerde sırasıyla; nesnelerin interneti ve mimarisi, Nİ uygulama alanları ve nesnelerin interneti yazılım platformları ele alınacaktır. Bu bölümleri takiben; beşinci, altıncı ve yedinci bölümlerde sensörler, Nİ uygulamaları ve güvenlik sorununa değinilecektir. Son olarak, sekizinci ve dokuzuncu bölümlerde nesnelerin internetinin İSG alanına ilişkin uygulamalarına yer verilerek sonuçlar ortaya konulacaktır.

## 2. Nesnelerin İnterneti

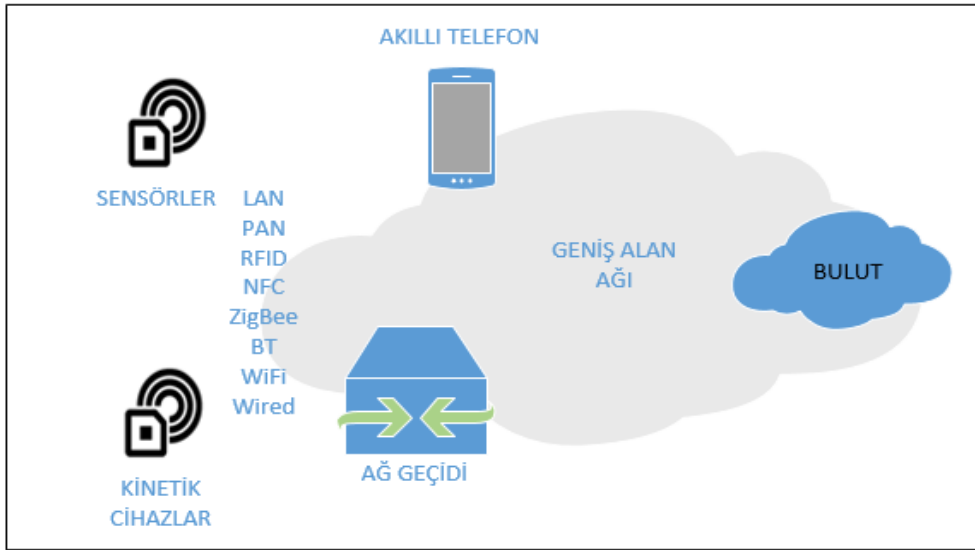
21. yüzyıla kadar insanoğlunun yaşamını büyük oranda etkileyen üç büyük sanayi devrimi gerçekleşmiştir. 18. yüzyılda, üretimin artmasını mümkün kılan ve buhar makinelerine dayalı Birinci Sanayi Devrimi (Endüstri 1.0) yaşanmış, 20. yüzyılda ise seri üretim tabanlı ve elektrik enerjisini esas alan İkinci Endüstri Devrimi (Endüstri 2.0) etkisini hissettirmeye başlamıştır (Yang, 2017). Üçüncü Endüstri Devriminde (Endüstri 3.0) ise üretimde kullanılan analog sistemler terkedilerek bilgisayar kontrollü sistemler kullanılmıştır. Sanayi devriminin dördüncü kuşağı olarak nitelendirilen Endüstri 4.0'te ise; siber fiziksel sistemler, öğrenen robotlar, bulut bilişim, yapay

zeka, büyük veri vb. kavramlar döneme yeni bir boyut kazandırmıştır. Üretim süreçlerinde kullanılan verinin sistem tarafından toplanması, tasarlanması, denetlenmesi ve yorumlanmasına ilişkin bu evrede nesnelere internetinin önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. (Erturan ve Ergin, 2017).

Nİ kavramı, ilk kullanıldığı 1999 yılından bu yana farklı biçimlerde tanımlanmış ve kapsamlı bir tanım Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı tarafından yapılmıştır (OECD, 2016). Bu rapora göre nesnelere interneti; insanların yaşam biçimini kolaylaştıran ve hayat standartlarını artıran akıllı uygulama ve hizmetlerin entegrasyonu olarak görülmekte, nesnelere ve makinelerin ya da cihazların kendi aralarında konuşmalarını, veri üretmelerini, bu verilerin sosyal ortamda paylaşılmasını mümkün kılan bir teknoloji olarak ifade etmektedir. Nİ kavramına ilişkin diğer tanımlar şu şekilde verilebilir:

- Gelişen sistemlerin, genişleyen ağ bağlantılarının ve artan işlem gücünün doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan; göz önünde bulundurulmayan günlük faaliyetler kapsamında, insan müdahalesi olmadan veri toplama, paylaşma ve karar verme yeteneğidir (Rose ve diğ., 2015).
- İletişim kurma, verileri anlamlandırma, yorumlama ve hesaplama yeteneğidir (Voas, 2016).
- Herhangi bir zaman ve yerde, kablosuz ağ üzerine bağlanmayı mümkün kılan nesnelere içeren sensör ve cihazların bütünleşmesidir (Minerva ve diğ., 2015).

Nİ teknolojisinin farklı tanımları olmakla birlikte kavramın “İnternet” ve “Nesneler” gibi iki bileşenden oluşması dikkat çekici bir husustur. Dolayısıyla, İnternetin her yerde ve zamanda bulunması durumunda, bu teknolojinin benimsenmesinin mümkün olabileceği ifade edilebilir. Buna ek olarak, herhangi bir nesnenin veri kaynağı olabilmesi, özel ve kamu kurumlarının iş yapma biçimlerini ve günlük yaşama ilişkin alışkanlıklarını değiştirecektir. Örneğin boyutu ve maliyeti göz önüne alındığında sensörler; evlere, iş yerlerine, kamu alanlarına kolaylıkla entegre edilebilecekler ve böylelikle nesnenin bütünleşmesi, uyumu ve işbirliği söz konusu olabilecektir. Nesnelere internetinin genel topolojisi Şekil 2’de verilmiştir (Minerva ve diğ., 2015).



Şekil 2. Nesnelere İnterneti Genel Topolojisi (Minerva ve diğ., 2015).

Bu genel yapıya göre; sensörler aracılığıyla toplanan veriler, işlenmeleri amacıyla insan-makine, makine-makine iletişimi için gerekli olan RFID, Zigbee, Bluetooth, LPWAN vb. iletişim protokolleri altyapısı üzerinden veri işleme merkezine gönderilirler. Veri işleme merkezinde küçük boyuttaki veri işleme faaliyetleri gömülü sistemler aracılığıyla gerçekleşmekle birlikte büyük ölçekli uygulamalarda bu veriler son aşamada büyük veriyi oluşturacak bulut bilişim sistemlerine iletilirler.

## 2.1 Nesnelere İnterneti Yapısı

Nİ, küçük bir nesne grubunu temsil edebileceği gibi sayısı milyonlara ulaşan bir nesne bileşimini de birbirine bağlayabilir. Bu sistem, kavramsal bağlamda, akıllı cihazların üç temel bileşeni olarak ifade edilen “nesnelere”, “nesnelere bütünleşmesini sağlayan internet ağı” ve “bu nesnelere elde edilen veriyi kullanan bilgisayar sistemleri”nden oluşmaktadır (Şişmanyazıcı, ve Doğan, 2016). Buna ek olarak, nesnelere internetine ilişkin yapı Şekil 3’te verildiği gibi nesnelere interneti mimarisi olarak da ifade edilmektedir (Khalil, ve Özdemir).

İş Katmanı (Business Layer)
Uygulama Katmanı (Application Layer)
Hizmet Yönetim Katmanı (Servis Management Layer)
Nesne Soyutlama Katmanı (Object Abstraction Layer)
Nesneler Katmanı (Objects Layer)

Şekil 3. Nesnelerin İnterneti Mimarisi

İzleyen bölümlerde Nİ mimarisi ve bu mimarinin bileşenleri hakkında açıklayıcı bir bilgi sunulacaktır.

### 2.1.1 Nesneler Katmanı (Objects Layer)

Nesneler ya da cihazlar katmanı, algılama katmanı olarak da ifade edilmekte ve beş katmanlı nesnelerin interneti mimarisinin en alt bileşenini oluşturmaktadır. Bu katman, ağ bağlantıları arasında yer alan arayüz işlevi görenek yüksek frekanslı sinyal uygulamaları ile farklı teknolojileri algılama ve iletme imkanı sağlar. (Lyu ve Yin, 2020). Diğer bir deyişle nesneler katmanı; fiziksel algılayıcıları kullanarak bilgi toplama ve işlemeyi mümkün kıldığı gibi, verileri bilgisayar ortamına aktarıp güvenli kanallar aracılığıyla nesne soyutlama katmanına gönderme işlevini de yerine getirmektedir.

### 2.1.2 Nesne Soyutlama Katmanı (Object Abstraction Layer)

Bu katmanın amacı; nesneler katmanında üretilen verilerin, güvenli haberleşme kanalları aracılığı ile hizmet yönetimi katmanına iletilmesidir. Bulut bilişimi gibi sistemlerin oluşturulması ve veri yönetim süreci, bu katmanda ele alınan temel faaliyetlerdir. Gelişen teknoloji sayesinde, mobil cihazlarda daha az enerji tüketimini ve daha hızlı iletişimi mümkün kılan iletişim teknolojilerinden bu katmanlarda yararlanmak mümkündür (Fuqaha, ve diğ., 2015).

### 2.1.3 Hizmet Yönetim Katmanı (Servis Management Layer)

Ara yazılım, işletim sistemi ve bu işletim sistemi üzerindeki uygulamaları çalıştıran yazılım olarak da adlandırılan bu katman, adres ve isim tabanlı isteklerle hizmetleri eşleştirmektedir. Hizmet yönetim katmanı (HYK); alınan verileri işlemekte, karar verme algoritmaları kullanarak farklı protokoller aracılığı ile gerekli servislere bilgi taşımakta ve belirlenen diğer işlemleri yapmaktadır. Buna ek olarak, farklı türlerdeki nesneleri içeren nesnelerin interneti sistemleri, hizmet yönetim katmanı aracılığıyla belirli donanım platformlarına ihtiyaç duymadan çalıştırılabilmektedirler (Wu ve diğ., 2010).

### 2.1.4 Uygulama Katmanı (Application Layer)

Nİ sistemleri; sadece teknolojik ilerlemelere bağlı olarak değil, başarılı iş modelleri ve çeşitli yeni uygulamalar aracılığıyla da gelişmektedirler. Uygulama katmanı (UK), nesnelerin interneti sisteminin gereksinimlerini karşılayacak çözümlerin üretildiği bir alandır. Örneğin, kullanıcıların gereksinim duydukları doğru sıcaklık değeri, havadaki nem miktarı v.b bilgiler bu katman tarafından sağlanmaktadır. Bir başka deyişle, bu katmanın temel işlevi, veri gereksinimini daha yüksek kalite ve hızda gidermesidir. (Wu, ve diğ., 2010).

### 2.1.5 İş Katmanı (Business Layer)

İş katmanı, Nİ sisteminin temel etkinliklerinin ve hizmetlerinin yönetildiği yapıdır. Bu katman; sistemin güvenlik ve etkinliğini sağlamak amacıyla, kimlik doğrulama protokolü, etkili veri işleme yeteneği vb. bütünlük standartları bünyesinde barındırmaktadır (Lyu, ve Yin, 2020). İş katmanının temel işlevi; uygulama katmanından

alınan verilere dayanarak, iş modelleri, grafikleri, akış şemaları vb. çıktıları üretmeye yardımcı olmaktadır. Bir başka deyişle iş katmanı; nesnelere interneti sistemine bağlı bileşenlerin tasarımını, analizini, uygulamasını, değerlendirilmesini ve geliştirilmesini sağlayan faaliyetleri yerine getirmektedir (Khalil, ve Özdemir, 2018).

### 3. Haberleşme Teknolojileri

Nİ mimarisi, bir yerden başka bir birime herhangi bir kablo hattı kullanmadan veri, ses veya görüntü taşınması işlemi olarak tanımlanmakta olan kablosuz ağ araçları (KAA) teknolojilerine bağlı olarak çalışmaktadır. Bu bağlamda, kablosuz haberleşmeyi kablolu haberleşmeden farklı kılan temel unsurun haberleşme çevresi olarak havanın kullanılması olduğu ifade edilebilir. İlerleyen bölümlerde bu haberleşme teknolojilerinden bazıları hakkında kısa bilgiler sunulacaktır.

#### 3.1 Wi-Fi (Wireless High Fidelity)

Kablosuz ağ anlamında kullanılan Wi-Fi, esasen tescillenmiş bir marka adıdır. Kablosuz ağ teknolojisine uyumlu araçların pazarlanması konusunda "IEEE 802.11b Direct Sequence" teknik ifadesi yerine akılda kalıcı, anlaşılır ve geniş tüketici pazarına uygun bir terim arayışının ürünüdür. Wi-Fi teknolojisi, transistörlü radyoların çalışma prensibiyle benzer bir şekilde çalışır ve kablosuz ağ sistemleri radyo frekanslarına dayalı olarak oluşturulur. Wi-Fi bağlantısının gerçekleşebilmesi için sinyali yayan modem gibi bir cihaz ve bu sinyalleri karşılayarak veriye dönüştürebilecek başka bir cihazın kullanımı zorunluluk taşımaktadır. (Song ve Issac, 2014).

#### 3.2 Radyo Frekansı Tanımlama: RFID

Nİ yapısı içinde kullanılan bir diğer haberleşme teknolojisi ise nesnelere radyo dalgaları ile tanımlamak için kullanılan RFID (Radio Frequency Identification) teknolojisidir. Nİ kavramının temeli, özgün adresleme sistemlerini kullanarak nesnelere birbiriyle etkileşimini mümkün kılmaktır (Giusto ve diğ., 2010) RFID aracılığıyla, mikroişlemci ve anten içeren bir etiket taşıyan nesnenin hareketi ve taşıdığı bilgi, kablosuz iletişim teknolojisi kullanılarak takip edilebilmektedir. Diğer bir deyişle RFID, kablosuz iletişim araçları kullanılarak herhangi bir nesnenin otomatik olarak tanımlanabilmesi, izlenebilmesi, nesneye ait aktif bilgilerin oluşturulması, toplanması ve yönetilmesini mümkün kılmaktadır. RFID'nın kullanım alanları arasında; havaalanı-bagaj takibi, bilet yönetimi, taşıma ve lojistik yönetimi, posta takibi, elektronik eşya izleme, perakende giyim, hırsızlığa karşı eşya koruması, araçlara kontrollü hızlı erişim, sıcaklık kontrolü, kaza önleme, akıllı ev sistemleri ile ev izleme, araç kilitleme, personel ve müşteri takibi vb. sayılabilir.

#### 3.3 Bluetooth

Bluetooth, verinin kısa mesafeler arasındaki kablosuz ağ üzerinden hızlı bir şekilde aktarılması olarak tanımlanmaktadır. 1994 yılında ilk kez kullanılmış olan bu teknoloji, temel olarak radyo frekansları (RFID) üzerinden iletişim kurulmasına imkan tanımaktadır. Bluetooth teknolojisiyle 24 Ghz hızında iletişim kurulduğu ifade edilirken cihazlar arasındaki mesafenin yaklaşık 10 metre olmasının iyi bir performans elde etmek için gerekli olduğu vurgulanmaktadır. Bluetooth aracılığı ile yapılan veri aktarım hızı, cihazların kapasitesine göre 1 Mbps ile 721 Mbps arasında farklılık göstermektedir. Bluetooth teknolojisi günümüzde; akıllı telefon, kulaklık, fare, klavye, araç kitleri, hoparlör, akıllı saat, yazıcı ve tarayıcı vb. pek çok cihazda kullanılmaktadır (Hassan ve diğ., 2018).

#### 3.4 Zigbee

Arıların çiçekten çiçeğe dolaşırken diğer arıların kaynaklara nasıl ve nereden ulaştığı bilgileri ile hareket ettikleri zigzag yolundan esinlenerek isimlendirilen IEEE 802.15.4 standardını temel alan ve düşük enerji tüketimini mümkün kılan bir kablosuz iletişim teknolojisi. İlk kez Zigbee Alliance tarafından geliştirilen Zigbee genel standardına dayalı Zigbee aygıtları uykuya dalarak enerji tasarrufu sağlamaktadır. (Evgen, 2017).

#### 3.5 Wimax

Wimax teknolojisi "Worldwide Interoperability for Microwave Access" kelimelerinin kısaltılmış halidir. IEEE 802.16 standardı ile eşanlamı olan bu standartlar IEEE tarafından elektronik alanında geliştirilmiş olan teknolojilere verilen kod numaralarıdır. WiMAX teknolojisi; sabit istasyonlar için yaklaşık 50 km, mobil istasyonlar için yaklaşık 15 km çapında bir alanda etkili ve 70 Mbps hızında kablosuz internet erişimi sağlayan, daha verimli bir bant genişliği kullanımını mümkün kılan, uzun mesafelerde daha fazla veri iletimini amaçlayan ikinci nesil bir protokoldür (Evgen, 2017).

#### 4. Nesnelerin İnterneti Yazılım Platformları

Yazılım platformları, teknolojilerin sunduğu hizmetleri kullanılabilir hale getirmek için tasarlanmış özel bir ara katman aracıdır. Bir başka deyişle bu yazılımlar, yeni hizmetlerin geliştirilmesini kolaylaştırmakta ve eski teknolojileri yeni teknolojilere entegre etmekte büyük bir rol oynamaktadırlar. Nİ yazılım platformları, nesnelere veri arasında bir bağ kurmakta ve nesnelere tarafından üretilen verileri anlamlandırma ve arka plandaki uygulamaların analizini mümkün kılmaktadırlar. Bu yazılım platformları arasında; Appceletor Titanium (web yazılım dilleri javascript, Php, Phyton üzerinden uygulama geliştirmek), AWS IoT (Bağlı cihazların bulut uygulamaları ile diğer cihazlarla güvenli bir şekilde etkileşimi), IBM Watson IoT Platform (gerçek zamanlı veri analizi), ThingWorx (Sunduğu teknolojiler ve araçlar ile sistemler arasındaki karmaşık bağlantıları ortadan kaldırır) vb. sayılabilir. Bu farklı platform alternatifleri arasında doğru tercihi yapmak; cihaz yönetimi, bilgi güvenliği, veri analizi ve görüntüleme gibi çok kriterli bir yapıyı dikkate almayı gerektirmektedir. İzleyen bölümlerde yazılım platformlarının seçim sürecinde kullanılan bu kriterlerden kısaca söz edilecektir (Balamuralidhara, ve diğ., 2013).

##### 4.1 Cihaz Yönetim Hizmeti

Cihaz yönetim hizmeti; kaynaklara erişim, cihazlar üzerinde yer alan yazılımın güncellenmesi ve kurulması, bağlantının kontrol edilmesi, sistemdeki cihazların tespit edilmesi, internete bağlanmaları için kimlik numaralarının verilmesi, farklı ağların birbiri ile iletişim kurulmasının sağlanması ve sensörlerin topladığı verilerin kaydedilmesi gibi faaliyetleri içermektedir.

##### 4.2 Analitik Çözümleme (Analytics) Hizmeti

Analitik çözümleme hizmetleri sürecinde sensörler üzerine gerçek zamanlı analizlerin yapılması amaçlanmaktadır. Bu hizmetin sağladığı faaliyetler arasında; istatistiksel işlemler, veri madenciliği, makine öğrenmesi (Machine Learning), işleme dayalı kurallar, örüntü algılama, gerçek zamanlı analitik işlemler vb. sayılabilir.

##### 4.3 Görüntüleme Hizmeti

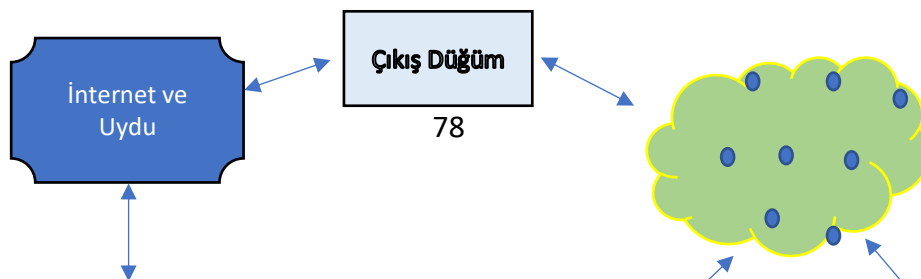
Nİ platformu, analitik çözümleme hizmetine ek olarak verileri uygun bir şekilde görüntüleme işlevini de yerine getirmelidir. Görüntüleme, veri analizi ile eş zamanlı çalışır ve bu sistem uygulama programlama arayüzlerinin (API) kullanımını gerektirmektedir (Khalil, ve Özdemir, 2018).

##### 4.4 Veri Analizi

Nİ ekosisteminde toplanan dijital veriden anlamlı sonuçlar elde etmek, bu verilerin insan karar vericiler veya yapay zeka sistemler tarafından analiz edilmesini gerektirmektedir. Bu kapsamda; “gerçek zamanlı”, “yığın analiz”, “tahmini analiz” ve “etkileşimli analiz” olarak adlandırılan dört veri analiz yöntemi bulunmaktadır (Perera, 2017). Gerçek zamanlı veri analizi, internet ortamında indirilen veri içeriğinin indirme işlemi bitmeden işlenmeye başlaması sürecidir. İnternette canlı müzik, video yayını, resim gösterimi vb. yaygın kullanım alanları olarak ifade edilmektedir. Yığın analiz işlemleri ise, küme halindeki veri üzerinden gerçekleştirilen ve hedeflenen işlemlerin kısa zaman aralıklarında yerine getirilerek birkaç saat veya gün sürebildiği analiz türleridir. Bir diğer analiz türü olan tahmini analiz ise, çeşitli istatistiksel tekniklere dayalı olarak tahminlerin yapılması işlemidir. Örneğin, makine öğrenme yöntemi ile hava durumunun tahmin edilmesi, cihazların bakım zamanlarının ve kullanım sürelerinin planlanması vb. pek çok işlem benzetim yöntemleri kullanılarak bu kapsamda yerine getirilmektedir (Khalil ve Özdemir 2018). Son olarak etkileşimli analiz ise; tahmin parametrelerinin gerçek zamanlı olarak değiştirilmesini mümkün kılan ve bu değişikliklerin sonuca nasıl yansıdığını ortaya koyan bir analiz aracıdır.

#### 5. Sensörler

Temel kullanım amacı çevreyi anlamak, kontrol ve bilgi elde etmek ve bu bilgiyi işleyerek karar sürecine yardımcı olmak şeklinde ifade edilen sensörler, fiziksel ortamda oluşan değişiklikleri algılayan elektrik-elektronik cihazları birbirine bağlayan bir köprü görevini yerine getirmektedir. Bir başka deyişle sensörler, algılayıcı düğüm (bilgisayar ağına bağlı ve adresi verilerek erişilebilen cihazlar) adı verilen pek çok sayıda küçük yapının bütünleşik olarak çevredeki belli bir bilgiyi tespit edip ana istasyona iletmesi işlevini yerine getirmektedir. Şekil 4'te bir sensör alanına dağılmış sensör düğümleri sergilenmektedir.



## Görev Yöneticisi Düğümü

### Şekil 4. Bir Sensör Alanına Dağılmış Sensör Düğümleri

Kaynak-kısıtlı olarak tasarlanan bu düğümler, birbiri ile iletişim kurulabilmesi için kullanılan kablosuz haberleşme modülleri ve bütün bu süreci yönetecek bir işlemciden oluşmaktadır. Tasarım bağlamında ele alındığında, bu küçük mimarinin düşük seviyede enerji tüketecek şekilde planlanması önemli bir ölçüttür (Akyıldız ve diğ., 2002; OECD 2016).

Lojistik, sağlık, tarım, inşaat, savunma, havacılık, otomotiv, enerji vb. gibi birçok endüstride kullanılan nesnelerin interneti teknolojisinin asıl yapı taşı sensörlerdir. Diğer bir deyişle, bu oluşumun beyni internet olarak kabul edilirse sensörlerin de göz veya kulak gibi bir duyu organı işlevi gördüğü ifade edilebilir. Sensörler aracılığıyla, kullanılan cihazlar hem birbirini hem de dış dünyadaki yaşamı algılayıp anlamlandırabilir, ısı, ışık, nem, temas gibi girdileri dijital ve kullanılabilir sinyallere dönüştürebilirler.

## 6. Nesnelerin İnterneti Uygulama Alanları

Nİ, veri miktarının hızla artması ve bilgi teknolojileri alt yapısının gelişmesi ile geleneksel iş yapma modellerinde devrim yaratarak firmalara rekabet gücü ve dinamizm kazandırmaktadır. Gelecek birkaç yılda, trilyonlarca sensörün, akıllı sistemler ile bütünleşik olarak gerçekleştireceği milyonlarca uygulama vasıtasıyla kaynakların etkin kullanımı söz konusu olabilecektir. Bulut teknolojisi eksenli olarak oluşturulan nesnelerin interneti dünyasında, internet üzerinden erişimi söz konusu olan yazılım uygulamaları yaşamın içine giderek artan oranda nüfuz edecektir (Doysuk ve Tiftik, 2017).

Nİ'nin iş modelleri bağlamında bir değer haline gelmesi gerçeğini, şu çarpıcı örneklerle ifade edebiliriz: evin dışında bekleyen aracın nesnelerin interneti yardımıyla kapının önüne gelmesi, birçok sistemin kullanıcıya hissettirilmeden çalışması, temiz su, hava kirliliğinin giderilmesi, blokzincir tabanlı katı atık depolama sahası uygulamaları, akıllı enerji paylaşımı, etkin Nİ ve blokzincir tabanlı bakım-onarım, güvenli tarım, güvenli gıda üretimi ve nakliyesi, akıllı şehir uygulamaları, giyilebilir teknolojiler vb. İzleyen bölümlerde nesnelerin interneti teknolojisinin bazı uygulama alanları biraz daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

### 6.1 Akıllı Şehirler

Akıllı şehirler, operasyonel verimliliği artırmak amacıyla kaynakları verimli bir şekilde yöneten ve sensörlere dayalı büyük veri teknolojisi ve ağ yapısını kullanan alanlardan oluşan bölgelerdir. Akıllı şehirlerin tasarımı için kullanılan temel teknolojiler; internet, büyük veri, bulut bilişimi, blokzincir ve Nİ olarak özetlenebilir (Jiang, 2020). Akıllı nesneleri fiziksel altyapı ile bütünleşik olarak sunan kentsel faaliyetler, güvenilirliği ve etkinliği artırarak işlevselliği çoklamayı amaçlamaktadır. Sözü edilen bu fayda; kaynak tüketimini, israfı ve toplam maliyetleri azaltırken güvenliği de arttırmaktadır. Örneğin akıllı ağlar ve sayaçlar, Nİ teknolojisini kullanarak enerji tüketimi ile ilgili bilgi toplayıp enerji piyasasının akıllı bir şekilde yönetilmesini sağlamaktadır. Bir diğer örnek, Nİ teknolojisi kullanılarak trafik başta olmak üzere ulaşım sorunun çözüme kavuşturulmasıdır. Şehrin çeşitli noktalarına konulan sensörler aracılığıyla elde edilen konum, hız vb. bilgiler, trafiğin yoğun olduğu durumlarda alternatif çözümler oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Böylelikle, trafiğin gerçek zamanlı bilgisi kullanılarak sinyalizasyon süreleri anlık olarak değiştirilmekte ve acil durumlarda hızlı ve etkili müdahaleler gerçekleştirilebilmektedir (Vicini, 2012).

### 6.2 Sağlık Uygulamaları

Bilgi, haberleşme ve ağ teknolojilerindeki gelişmeler; sağlık hizmetlerinin yeniden tasarlanmasına neden olmakta, bilginin etkin ve etkili kullanılması enformasyon sistemlerinin geliştirilmesini de beraberinde getirmektedir. Tıp ve bilgi teknolojilerinin bütünleşmesi sonucunda sağlık hizmetleri de bir dijital dönüşüm sürecini yaşamaktadır. Bu gelişmeler; maliyetlerin düşmesini, verimsiz süreçlerin azalmasını ve her şeyden önemlisi de kaliteli yaşam sürelerinin uzamasını sağlamaktadır (Dimitrov, 2016). Günümüzde sağlık hizmetlerinin izlenmesi ve denetlenmesi sürecinde akıllı cihazların ve iletişim uygulamalarının kullanımı giderek artmaktadır. Örneğin, Nİ teknolojisi kullanılarak hastaların durumlarının daha yakından takibi mümkün olmakta,

özellikle kronik hasta ve yaşlıların gerçek zamanlı kontrolü ve bakımı gibi önemli faaliyetler yaygın bir biçimde gerçekleştirilmektedir.

Nİ'nin önemli uygulama alanlarından biri de COVID-19 vb. pandemilere karşı alınacak önemlerin tasarlanmasıdır. Örneğin, insansız hava araçları, maske kullanımı ve karantina uygulamalarını kontrol amaçlı olarak çevreyi gözetlemede kullanılabilir. Buna ek olarak, bu teknoloji aracılığıyla bir salgının kökeni incelenebilmekte, gerekli veri toplanabilmekte, hastalarla temas eden kişiler tespit edilebilmekte, hastaların karantinaya uyumu sağlanabilmekte, karantinayı ihlal eden hastalar izlenebilmekte ve evdeki hastaların uzaktan izlenmesi yoluyla sağlık personelinin rahatlatılması söz konusu olabilmektedir (Javaid, 2020).

### 6.3 Lojistik Uygulamaları

Nİ, lojistik süreç ve uygulamaların yeniden tasarlanmasını mümkün kılmış, bu yeni lojistik iş modeli kapsamında; bilgi ve iletişim alışverişi, akıllı aramalar, kimlik, yer tespiti, izleme, takip ve yönetim uygulamaları yaygın bir kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Nİ'nin kullanımı ile ürün, depo ve mağaza gibi tesisler arasında gerçek zamanlı bağlantılar kurulabilmektedir. Bir başka deyişle; özellikle blokzincir tabanlı nesnelerin interneti uygulamaları ile taşıma, depolama, gümrükleme vs. lojistik faaliyetleri daha etkin bir şekilde yerine getirilebilecektir. Örneğin, soğuk zincir taşımacılığı gıda ve ilaç sektöründe önem kazanmış ve ürünlerin belli bir sıcaklık sınırında taşınması araç içi sensörler ve dağıtık veri tabanları aracılığıyla garanti altına alınabilmektedir (Korcak ve Kijewskab, 2019).

### 6.4 İnşaat Uygulamaları

Hızla artan teknolojik gelişmeler, geleneksel yöntemlerin terkedilmesine ve birçok alanda yeni uygulamalara yer verilmesine neden olmaktadır. İnşaat sektörü de yenilikçi uygulamaların sıklıkla görülmeye başladığı alanlardan biridir. Nİ, blokzincir ve bulut bilişim teknolojisinin kullanımı ile inşaat mensuplarının sahada çalışırken zamanında karar verme ve raporlama yapabilmesi, gerçek zamanlı erişim için verilerin depolanması, devam eden inşaat çalışmaları esnasında bir mühendisin veya ustanın yapı çizim projelerinin en son haline sahada ulaşabilmesi söz konusu olabilmektedir (Keleş ve Keleş, 2018).

Bir başka örnek, Nİ sistemi tabanlı bir çok inşaat projesinde RFID teknolojisinin kullanımıdır. RFID aracılığıyla şantiyeye girip çıkan malzemenin takibi ve bina malzemelerine erişim sağlanmakta, bu sayede inşaat tedarik zincirinde ve stok kontrol masraflarında bir azalma söz konusu olmaktadır (Tanyer ve diğ., 2008). Buna ek olarak, nesnelerin interneti ve blokzincirin bütünlük uygulamaları sonucunda görünürlük, izlenebilirlik ve sistem içi denetlenebilirlik arttırılabilmektedir.

### 6.5 Tarım Alanında Uygulamalar

Tarımda verimliliğin arttırılması sürecinde teknoloji içeren araçların kullanımı büyük öneme sahiptir. Bu gelişim, tarım makinelerinin kullanılmasının yaygınlaşması ile başlayan ve daha büyük alanları daha az emek gücü ile ekip biçmemizi sağlayan mekanizasyon sürecini takip etmiştir. Günümüzde, tarım alanlarında sürdürülebilirliği sağlamak ve ekolojik çevre üzerinde olumsuz etkileri en aza indirmek amacıyla Nİ tabanlı yeni bir dönüşüm sürecine girilmiştir. Örneğin, uzaktan algılama ve görüntü işleme amacıyla tarım makineleri üzerine yerleştirilen sensör, kamera ve uzaktan kumandalı sistemler aracılığıyla seralarda sulama ve dijital izleme yapılabilmekte ve insansız hava araçları ile tarım alanlarının mevcut durumu tespit edilebilmektedir (Kırkaya, 2020).

### 6.6 Giyilebilir Teknolojiler

Giyilebilir/takılabilir özellikli araçlara verilen genel isim olan bu teknolojiler; mikroçipler, sensörler ve kablosuz iletişim yetenekleri ile donatılmış ağa bağlı akıllı cihazlar olarak eğitim, sağlık, tekstil, eğlence, turizm, savunma vb. birçok sektörde kullanım alanı bulmaktadırlar. Sağlık sektöründeki akıllı giysi uygulamalarıyla insan vücudunda bulunan çeşitli verileri toplamak, değişimi algılamak ve gerektiğinde tepki vermek mümkün olabilmektedir. Giyilebilir uygulamalar ve cihazlar kullanılarak sağlık çalışanlarının hastanın durumunu kolayca izleyebilmesi sağlanabilmekte ve istenmeyen durumlarda iç görüler belirleyerek daha gelişmiş bir teşhis süreci söz konusu olabilmektedir. Örneğin, Zephyr Anywhere'in BioPatch'i ile hasta durumunu gözlemek ve gerçek zamanlı veri sunmak mümkün kılınmış, doktorların saatlerine ya da akıllı mobil cihazlarına uyarı göndererek daha etkin bir yoğun bakım planlaması yapılabilmektedir (Öcal ve diğ., 2020).

## 7. Nesnelerin İnterneti Ve Güvenlik



Nesnelerin ağı kapsamında internete bağlanan nesnelerin sayısının giderek artması güvenlik açısından birtakım problemleri beraberinde getirmekte ve bu karmaşık sistem etkin bir biçimde yönetilmediğinde ciddi sorunlara yol açmaktadır. Günlük hayatta kullanılan çevrim içi fiziksel eşyalar, üreticiler tarafından akıllı kelimesiyle pazarlanmaktadır. Buna karşın, kullandığımız akıllı telefonlar, televizyonlar, beyaz eşya, ısıtma sistemleri, havalandırma sistemleri, yangın ve hırsız alarmları, bilgisayarlı cihazlar, modemler ve bilgisayarlar esasen üzerinde çok fazla güvenlik açığı barındırmaları sebebiyle belki de bu tip isimlendirmeleri gerçek anlamda hakketmemektedirler. Örneğin, 2013 yılında Rusya devlet televizyon kanalı Rossiya24, Çin'de üretilen ve ülkeye ithal edilen ütülerin özel bir kablosuz denetim çipi içerdiğini, bu çipler aracılığıyla kullanıcıların evindeki şahsi bilgisayarlara siber saldırı düzenlenerek casusluk yapıldığını öne sürmüştür. Önceleri bu haberin abartıldığı ve doğru olmadığı iddia edilse de yapılan incelemeler sonucunda haberin gerçekliği ortaya konulmuştur (Gündüz ve Raş, 2018).

Günümüzde kablosuz internetin tehdit içermeyen güvenli bir ortamda kullanımı; şifreleme, ve kriptolama aracılığıyla ile yapılmaktadır. Şifreleme, Nİ uygulamalarında da bilgi güvenliğini koruma konusunda önerilen temel çözümlerden biridir. Buna karşın, bir çok Nİ cihazının şifrelemeyi destekleyecek güçte olmadığı ve nesnelerin internetinde şifrelemeye imkan sağlayacak daha etkin ve düşük enerji kullanımını mümkün kılan algoritmalara ihtiyaç olduğu yaygın kabul gören bir gerçektir. Şifrelemeye ek olarak, kimlik yönetiminin korunmasını destekleyen teknolojiler de güvenlik açısından önemli bir konuyu oluşturmaktadır (Doyduk ve diğ., 2017). Nİ kapsamında kullanılan nesne sayısının artışı ile birlikte kişisel gizlilik konusu önem kazanmakta, gizlilik politika ve stratejilerinin oluşturulması zorunluluk arz etmektedir. Bir bakıma, Nİ'nde kullanılan akıllı nesne ve okuyucuların gizlilik politikaları ile donanmış olmalarının gerektiği ve bu bağlamda, okuyucunun akıllı nesne ile iletişime geçmeden diğerinin gizlilik politikasını kontrol etmesinin önemli bir korunma yöntemi olduğu ifade edilmektedir (Roman ve diğ., 2011).

Nİ tabanlı cihaz ve uygulamaların daha güvenilir ve saldırılara karşı daha güçlü olabilmesi için aşağıdaki sorunların ele alınması gerekmektedir (Khalil ve Özdemir 2018).

### 7.1 Verinin Mahremiyeti

Nİ, farklı cihazlardan büyük miktarda veri toplar ve farklı özelliklere sahip kaynaklardan gelen bu verileri işler. Veriler, çevrim içi olan her yerde olduğu gibi kablosuz nesnelere içinde de korunmalıdır. Veriler kablosuz bir şekilde iletilirken gizli ve şifrelenmiş olmalıdır. Buna karşın geleneksel şifreleme yöntemlerinin, enerji ve bant genişliği bakımından büyük miktarda kaynak tüketimine neden oldukları için etkin çalışmadıkları ifade edilmektedir. Nesnelerin interneti kapsamında uygulanmak üzere geliştirilen yeni çözümler, kaynakların kısıtlı olup olmadığına bakılmaksızın yeterli güvenlik seviyesi sağlayabilmelidir (Khalil ve Özdemir, 2018).

### 7.2 Web Arayüzü Yapılandırması

Kullanıcı ile makine arasında iletişim ve etkileşimi sağlamak amacıyla kullanılan web arayüzlerinin güvenlik altyapılarının güçlendirilmesi çalışmaları, nesnelerin interneti sistemlerinin güvenlik açıklarının giderilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin, güvenilir bir web sitesinin sahtesi geliştirilerek bir saldırı gerçekleştirilebilir ve bunu önlemek tek kullanımlık şifre ve şifreleme algoritmaları gerektirir. Buna ek olarak saldırgan, herhangi bir metin girişi olan ekrandaki özel karakterler vasıtasıyla SQL yapısal sorgulama dili kodlarını girerek veri tabanındaki bilgileri ele geçirebilir. Böylelikle, nesnelerin interneti tabanlı cihazlarda kullanıcının kimlik bilgilerini ele geçirecek istediği bilgiyi değiştirebilir veya silebilir (Turak, 2015).

### 7.3 Doğrulama Sistemi

Geleneksel ağ yapılarında, şifre ve açık anahtar şifreleme sistemleri gibi yöntemlerle yapılmakta olan kimlik doğrulama işlemi, Nİ uygulamalarında kullanılan cihazlar ve ağların farklılığı nedeniyle güvenli olmayabilir. Bu tür kimlik doğrulama sistemleri oluşturmak ve her bir nesneye bir kimlik sertifikası vermek, mevcut nesne sayısı genellikle çok büyük olduğundan oldukça zordur. Günümüzde nesnelerin interneti uygulamaları, blokzincir teknolojisi ile bütünleşik olarak sunulmakta ve böylelikle blokzincirin verilerin değişmezliği ve dağıtık olarak saklanması özelliğinden yararlanılmaktadır. Bu yüzden, yakın gelecekte blokzincir tabanlı Nİ uygulamalarına farklı tedarik zinciri ekosistemlerinde yer verilmesi öngörülmektedir (Banerjee, 2019).

### 7.4 Nesnelerin Yönetilmesi

Nİ tabanlı uygulamaların önemli bir bileşeni olan nesnelere, iletişim teknolojileri aracılığıyla sadece bağlantı kurmamalı buna ek olarak kendi kendilerini de yönetebilir olmalıdır. Kendi kendini yönetebilir olma işlevi; nesne yönetim sürecinin karmaşıklığı, cihazların açılıp kapanması, ağların yapılandırılması, yazılımın güncellenmesi, hataların giderilmesi, cihazların takibi ve bağlantı algoritmalarının toplanması gibi bir çok farklı işlem türünün birlikte dikkate alınmasını gerektirmektedir (Khalil ve Özdemir,2018). Nesnelerin kendi kendini yönetebilir olma özelliğini kazanması, güvenlik performansının artırılmasına yardımcı olacaktır.

## 8. Nesnelerin İnterneti ve İş Sağlığı Güvenliğine Olan Etkisi

Dünyada milyonlarca insan, her yıl ölümcül ya da ölümcül olmayan iş kazalarına maruz kalmakta ve Uluslararası Çalışma Örgütü'nün (ILO) son verilerine göre yaklaşık 2 milyon insan iş kazaları nedeniyle yaşamını yitirmektedir. İş kazaları ve iş kaynaklı fiziksel/psikolojik rahatsızlıklar; ekseriyetle kullanılan güvenli olmayan çalışma yöntemlerinin, iş alanlarını oluşturan fiziksel koşulların veya kullanılan teknolojik donanımların önemli risk unsurları oluşturmasından kaynaklanmaktadır. Bu çıkarım önemli olmakla birlikte, oluşan her kazanın ve/veya yaşanan hastalığın tek bir sebepten ziyade birden fazla sebebe dayandığını söylemek yanlış olmayacaktır (Hakkinen, 2014). Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, iş yeri ve çalışanların sağlığı, güvenliği ve sürdürülebilirliğini desteklemek amacıyla; mavi yakalı çalışanların, cobotların ve yöneticilerin işbirliği çerçevesinde aşağıda belirtilen dört konuyu dikkate almaları gerekmektedir (WHO, 2011). Bunlar: (1) Fiziksel iş çevresinin sağlığı ve güvenliği; (2) İş organizasyonu ve iş yeri kültürü gibi fizikososyal iş çevresinin sağlığı ve güvenliği (3) İş yerinde sağlık araçları ve kaynaklarının işveren tarafından sağlanması ve (4) Tüm çıkar gruplarının İSG amaçlarına ulaşabilmek için sağlıklı işbirliği ve iletişim içinde olabilmeleri şeklinde özetlenebilir.

Dünya Sağlık Örgütü'nün belirlediği ilkeler çerçevesinde sistem anlayışının kabul görmesi ve buna dayalı olarak ergonomi gibi alanların gelişmesi, teknoloji kaynaklı hataların azaltılması ve tasarlanan karmaşık operasyonların yönetilmesi amacıyla yeni adımların atılmasını mümkün kılmıştır. Yine sistem yaklaşımı kapsamında geliştirilen risk yönetimi anlayışına dayalı olarak, birçok endüstride iş yeri kaynaklı riskler belirlenmiş, tanımlanmış ve bu risklerle mücadele sürecinde önemli bir ilerleme kaydedilmiştir. (Khalil ve Özdemir, 2018).

İş sağlığı ve güvenliği yönetimi üzerine duyulan ilginin artması; OHSAS 18001, ANSI Z10, ISO 45001 gibi standartların ve İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi (İSGY) sistemlerinin ortaya konulmasının yolunu açmıştır (Erol, 2019). İş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemleri; tehlike ve riskleri belirlemek ve bu unsurları denetlemek için optimum usuller kullanılarak yapılan çalışmaların bütünüdür. Buna benzer sistemlerin kullanılması sonucunda, iş kazalarının önlenmesi ve işletmelerin iş güvenliği ile ilgili yasal yükümlülüklerini yerine getirmelerinin kolaylaşacağı düşünülmektedir. Buna ek olarak bu uygulamalar vasıtasıyla; iş güvenliğine yönelik düzenlemelerin çağdaş teknolojik gelişmelere uygunluğunun sağlanabilmesi ve iş kazalarının nedenlerinin belirlenerek bir kez daha meydana gelmesini önleyici sistemlerin kurulması umulmaktadır (Serin ve Çuhadar 2015).

Dördüncü Sanayi Devrimi'nin yaşanmakta olduğu günümüzde İSG Yönetim Sistemleri'nin vurgulanan fayda potansiyelini kullanabilmesi; iş verenlerin, karar vericilerin, hükümetlerin ve çalışanların temel arzudur. Yakın gelecekte küresel bir sınır ağının kurulmasının sonucu olarak, herkes ve her şeyin birbiri ile bağlantılı olacağı söylenebilir (Ersin, 2020). Bu bağlamda, sayısallaştırılmış bilginin etkin bir biçimde iletişimi, kullanımı ve gelişimi dördüncü endüstri devrimini yönlendiren anahtar faaliyetler olmuştur (Alam ve diğ., 2017; Zorzenon ve diğ., 2022). İnsanların dijital bilgiye gerçek zamanlı olarak ulaşabilmesi, İSG alanında da bir değişime neden olmaktadır (Rajendran ve diğ., 2020). Bu bağlamda, akıllı teknoloji ve giyilebilir akıllı cihazların güvenlik ve sağlık konusunda yeni fırsatlar yaratabileceği öne sürülmekte, bir başka deyişle, bu tür cihazlar aracılığıyla güvenlik yöneticilerinin davranışlarının izlenmesi, güvenlik ve sağlık önerilerinin iletişimi ve gerçek zamanlı olarak çalışanlara bilgi iletilmesi söz konusu olmaktadır (Gnoni ve diğ., 2020; Bavaresco ve diğ., 2021; Zhang ve diğ., 2022; Catarinucci ve diğ., 2022). Örneğin akıllı giyilebilir cihazlar; işçilerin yorgunluğunu, sendelemeyi, düşmeyi, hava kalitesini, zihinsel iş yükünü vb. unsurları fiziksel ürün üreten (inşaat, otomotiv, tekstil, elektronik, madencilik vs.) ve hizmet (enerji, lojistik, sağlık vb.) işletmelerinde izlemek için geliştirilmiş bir teknolojidir (Gregori ve diğ., 2018; Kanan ve diğ., 2018; Gnoni ve diğ., 2020; Madahana ve diğ., 2020; Palanivelu ve Srinivasan, 2020; Zhan ve diğ., 2022). Bir diğer örnek, giyilebilir ve nesnelerin interneti bağlantılı yorgunluk izleme araçlarının, uzun mesafeli araç şoförlerinde ve ağır makine operatörlerinde küçük uyku ataklarını tespit etmek amacıyla kullanılması olabilir (Financial Times, 2016).

Buna ek olarak, nesnelerin interneti tabanlı otomasyon ve robot teknolojilerinin işçilerin sağlığı ve güvenliği amaçlı olarak kullanılmakta olduğu ifade edilmelidir (Chen ve diğ., 2021; Pütz ve diğ., 2022; Bavaresco ve diğ., 2021; Zhang ve diğ., 2022). Bu tür yöntemler, çalışanların zihinsel sağlık riski ve kas-iskelet sistemi bozukluklarına yol açan tekrarlı iş yükünü hafifletebilecektir. Diğer bir deyişle, nesnelerin interneti tabanlı giyilebilir dış iskeletler bir kişinin alışkanlık haline gelmiş fiziksel ve ergonomik hareketlerini yönlendirmek ve takip etmek amacıyla kullanılabilir. Nİ teknolojisinin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki kullanımına ilişkin örnekler Tablo 1'de özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Nesnelerin İnterneti teknolojisinin iş sağlığı ve güvenliği alanındaki kullanımı

Referans	Kullanım Amacı
Alam ve diğ., (2017)	Arttırılmış ve sanal gerçeklik tabanlı IoT sistemleri oluşturarak bakım ve onarım işlerinde uzaktan algılama ve

	denetlemenin sağlanması.
Baena-Navarro ve diğ., (2020)	Çalışma radyasyon seviyesinin denetlenmesi ve gerekli uyarıların yapılması.
Zhan ve diğ., (2020)	Soğuk hava depolarında uzaktan denetleme ve uyarı isteminin oluşturulması.
Mofidi Naeini ve diğ., (2022)	Montaj sistemine veri eldiveni ekleyerek risklerin azaltılması.
Bavaresco ve diğ., (2021)	Veri işleme yöntemleri ile iş gücünün psikolojik/ fiziksel sağlığını ve güvenliğini desteklemek.
Zorzenon ve diğ., (2022)	Otomotiv, inşaat, petrol endüstrisi ve tarım alanlarında IoT teknolojileri vasıtasıyla veri toplama, denetleme ve uyarı.
Sarkar De (2022)	Kütüphanede insan müdahalesi olmadan iletişim kurmayı sağlayan bağlantı ağının geliştirilmesi.
Li ve diğ., (2021)	IoT tabanlı kamera cihazları ile inşaat işçilerinin görüntülü bilgilerine erişim.
Asadzadeh ve diğ., (2020)	Covid 19 salgınında acil durumu yönetmek.
Xu ve diğ., (2022)	İnşaat endüstrisinde İSG yönetim sisteminin bir prototipini geliştirmek ve prototipin nasıl çalıştığını göstermek.
Vuki'cevic ve diğ., (2021)	Android platformunda bulunan sensörler kullanılarak oluşturulan sistem ile İSG alanında yetkililerin talep ettiği raporları sunmak ve çalışanların sürekli eğitimi sağlamak.
Campero-Jurado ve diğ., (2020)	Akıllı kask prototipi ile iş yerinde ortamı izlemek ve gerçek zamanlı risk değerlendirmesi gerçekleştirmek.
Teixeira ve diğ., (2022)	Giyilebilir cihazlar ile çalışanların duruş verilerinin toplanması ve gerektiğinde kullanıcının uyarılması.
Hinze ve diğ., (2022)	Giyilebilir teknolojiler yardımıyla ormancılık alanında çalışan işçiler hakkında veri toplanması.
Sadeghi ve diğ., (2022)	Madencilik alanında kablosuz sensör ağları aracılığıyla işçi sağlığı ve güvenliğinin iyileştirilmesi.
Zhang ve diğ., (2022)	Uzaktan algılamaya ve denetleme yoluyla inşaat alanlarındaki kaza sayısını azaltmak veya ortadan kaldırmak.
Khan ve diğ., (2022)	İnşaat alanlarında yüksekte düşerek yaralanma ve ölüm riskini azaltacak bir uyarı isteminin oluşturulması.
Ramanathan ve diğ., (2023)	Havadaki karbondioksit oranının denetlenerek solunum nedenli hastalıkların önüne geçilmesi.

## 9. SONUÇ

Üçüncü endüstri devrimi sonucunda geliştirilen teknoloji tabanlı birçok araç, iş dünyası ve sosyal hayat ilişkin sorunların çözümünde yaygın bir biçimde kullanmaya başlanmıştır. Buna karşın, geliştirilen bu araçların en büyük dezavantajı genellikle birbirleri ile iletişim kuramamaları ve bütünleşik olarak çalıştırılmamalarıdır. Endüstri 4.0 'ın gelişi ile birlikte bu kısır döngüden sıyrılmak mümkün olmuş ve birbiriyle haberleşen bütünleşik sistemler geliştirilebilmiştir. Nİ adı verilen bu teknolojiye dayalı uygulamaların birçok endüstri ve tedarik zincirinde yaygınlık kazandığı ve bu sistemlerin performanslarının büyük oranda iyileştirilebildiği görülmektedir.

Buna ek olarak nesnelerin interneti, sadece kâr odaklı performans göstergelerine yönelik olarak iyileşme sağlamamış, İSG'ye ilişkin nesnelerin interneti uygulamaları ile tedarik zincirlerinin sosyal sürdürülebilirlik performanslarının da geliştirilmesine de katkıda bulunmuştur. Nİ'nin kullanım alanları arasında; yenilenebilir enerji, lojistik ve tedarik zinciri, medikal ve sağlık sistemleri, ulaşım, çevre analizi, tarım ve gıda, ev ve bina otomasyonu ve fiziksel ürün üreten işletmeler başta gelmektedir. Bu uygulama alanları arasında son yıllarda yaygınlaşan ve Nİ'nin İSG sistemlerinin iyileştirilmesine ilişkin kullanımı yer almaktadır. Nİ'nin İG alanında kullanımı sonucunda aşağıdaki faydaların elde edilmesi öngörülmektedir:

- İSG politikalarının iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi
- İSG denetleme ve gözlemlerinin otomasyon sayesinde kolaylaştırılması
- Daha güvenli ve istikrarlı operasyonel gerçekleştirme yeteneğinin kazanılmasına yardımcı olabileceği
- İSG işlevleri üzerine gerçek zamanlı veriler elde etme
- Gelişen çalışan sağlığı ve güvenliği performansı ve azalan devamsızlık
- İSG performansın artması sonucunda çalışanlara ödenecek tazminatlar ile ilgili maliyetlerin azalması

Bu makalede, Endüstri 4.0'ın önemli bileşenlerinden olan nesnelerin interneti tanımlanmış, bu teknolojiye ilişkin uygulamalara yer verilmiş, güvenlik sorununa değinilmiş ve son olarak da nesnelerin internetinin İSG alanındaki uygulama potansiyeli ve örnekleri tartışılmıştır. Nİ ve buna benzer teknolojilerin bütünleşik olarak kullanılabilme potansiyellerinin ele alındığı yeni tarama araştırmalarının, mimari geliştirmeye yönelik örnek olayların ve Nİ ile İSG performansları arasındaki ilişkinin tartışıldığı ampirik çalışmaların gelişmiş ve gelişmekte olan ülke verileri kullanılarak hazırlanması alanın gelişimine katkı sağlamak açısından büyük önem taşımaktadır.

#### Araştırmacıların Katkısı

Araştırmannın yazarları araştırmannın tüm süreçlerine eşit derecede katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

Alam, M. F., Katsikas, S., Beltramello, O., & Hadjiefthymiades, S. (2017). Augmented and virtual reality based monitoring and safety system: A prototype IoT platform. *Journal of Network and Computer Applications*, 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.03.022>

Al-Fuqaha, M., Guizani, M., Mohammadi, M. Aledhari, M. & M. Ayyash, (2015). Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, pp. 2347-2376. Doi: [10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095)

Alli, B. O. (2008). Occupational safety and health: A global perspective. *Second edition*, Erişim adresi: [http://ilo.ch/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/article/wcms\\_098126.pdf](http://ilo.ch/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/article/wcms_098126.pdf)

Akyıldız, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E, (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Commun. Magazine*, 102-114. Doi: [10.1109/MCOM.2002.1024422](https://doi.org/10.1109/MCOM.2002.1024422)

Ashton, K. (2009). That 'internet of things' thing. *RFID Journal*, vol. 97–114. Erişim adresi: <http://www.itreo.jp/libraries/RFIDjournal-That%20Internet%20of%20Things%20Thing.pdf>

Asadzadeh, A., Pakkhuo, S., Saeidabad, M., Khezri, H. & Ferdousi, R. (2020). Information technology in emergency management of COVID-19 outbreak. *Informatics in Medicine Unlocked*, 100475. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100475>

Baena-Navarro, R., Torres-Hoyos, F., Uc-Rios, C., & Colmenares-Quintero, R. F. (2020). Design and assembly of an IoT-based device to determine the absorbed dose of gamma and UV radiation. *Applied Radiation and Isotopes*, 166, 109359. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109359>

Balamuralidhara, P., Misra, P. & Pal, A. (2013). Software platforms for internet of things and M2M. *Journal of the Indian Institute of Science*, 487-498. Erişim adresi: <https://journal.iisc.ac.in/index.php/iisc/article/view/1907>

Bagay, D. (2020). Information security of Internet things. *Procedia Computer Science*, 179-182. Erişim adresi: <https://journal.iisc.ac.in/index.php/iisc/article/view/1907>

Banerjee, A. (2019). Chapter Nine - Blockchain with IOT: Applications and use cases for a new paradigm of supply chain driving efficiency and cost., *Advances in Computers*, 259-292. <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.07.007>

Bavaresco, R., Arruda, H., Rocha, E., Barbosa, J. & Li, G.-P. (2021). Internet of Things and occupational well-being in industry 4.0: A systematic mapping study and taxonomy.. *Computers & Industrial Engineering*, 107670. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107670>

Botti, L., Mora, C. & Ferrari, E. (2022). Design of a digital tool for the identification of confined spaces. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 104731. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104731>

Catarinucci, L., Colella, R., Corcione, C. E., Ingrosso, C., Greco, A., Ferrari, F., Curri, M. L. Leo, C. G. Mandriota, G., Molinaro, V., Montanaro, T., Patrono, L. Sabina, S. Sergi, I. Shumba, A. T. Spedicato, L. &

- Striani, R. (2022). Smart IoT system empowered by customized energy-aware wireless sensors integrated in graphene-based tissues to improve workers thermal comfort. *Journal of Cleaner Production*, 132132. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132132>
- Campero-Jurado, I., Márquez-Sánchez, S., Quintanar-Gómez, J., Rodríguez, S. & M.Corchado, J. (2020). Smart Helmet 5.0 for Industrial Internet of Things Using Artificial Intelligence. *MDPI Open Access Journal, SENSORS*, 6241. Erişim adresi: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6241>
- Chen, M., Ran, B., Gao, X., Yu, G., Wang, J., & Jagannathan, J. (2021). WITHDRAWN: Evaluation of occupational stress management for improving performance and productivity at workplaces by monitoring the health, well-being of workers. *Aggression and Violent Behavior*, 101713. <https://doi.org/10.1016/j.avb.2021.101713>
- Dimitrov D. V. (2016). Medical Internet of Things and Big Data in Healthcare. *Healthcare informatics research*, 156–163. Erişim adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4981575/>
- Doyduk, H.B.B & Tiftik,C. (2017). Nesnelerin İnterneti: Kapsamı, Gelecek Yönelimi ve İş Fırsatları. *Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi*, 127-143. Erişim adresi: <https://acikerisim.gelisim.edu.tr/xmlui/handle/11363/3492?locale-attribute=en>
- E. A. Khalil, & S. Özdemir, (2018). Nesnelerin internetine genel bir bakış: Kavram, özellikler, zorluklar ve fırsatlar. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 311-326. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/465802>
- Erol, M. (2019). Occupational Health And Work Safety Systems In Compliance With Industry 4.0: Research Directions. *International Journal of E-business and E-government Studies*, 11, 2, 119-133. <https://doi.org/10.34111/ijepeg.20191123>
- Erturan, İ.E. & Ergin, E. (2017). Muhasebe Denetiminde Nesnelerin İnterneti; Stok Döngüsü. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, 13- 30. Erişim adresi: <https://doi.org/10.25095/mufad.399246>
- Ersin, Ç. & Öz, Ali. (2020). IoT Based Embedded System Desing and Implementation for Occupational Health and Safety. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 494-504. Erişim adresi: <https://doi.org/10.31590/ejosat.692616>
- Evgen, T. (2017). Rfid ve Nesnelerin İnterneti Tedarik Zinciri Bilgi Yönetimi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2-87. Erişim adresi: <https://hdl.handle.net/11499/2047>
- Ferro, E & Potorti, F. (2005). Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: A survey and a comparison. *IEEE Wireless Communications*, 12-26. Doi: [10.1109/MWC.2005.1404569](https://doi.org/10.1109/MWC.2005.1404569)
- Financial Times, (2016). Wearable devices aim to reduce workplace accidents. Erişim adresi: <https://www.ft.com/content/d0bfea5c-f820-11e5-96db-fc683b5e52db>.
- Giusto, D., Lera A., Morabito, G. & Atzori I. (2010). The Internet of Things.” *Springer*. Erişim adresi: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-6345-e7c34d064f.pdf>
- Glowniak, J. (1998). History, Structure, and Function of the Internet. *Seminars in Nuclear Medicine*, Vol XXVIII, 135-144. [https://doi.org/10.1016/S0001-2998\(98\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S0001-2998(98)80003-2)
- Gnoni, M., G. Bragatto, P. A., Milazzo, M. F. & Setola, R. (2020). Integrating IoT technologies for an “intelligent” safety management in the process industry. *Procedia Manufacturing*, 511–515. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.040>.
- Gregori, F., Papetti, A., Pandolfi, M., Peruzzini, M. & Germani, M. (2018). Improving a production site from a social point of view: an IoT infrastructure to monitor workers condition. *Procedia CIRP*, 72, 886–891. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.057>.

- Gupta, M. Abdelsalam, M & Mittal, S. (2020). Enabling and enforcing social distancing measures using smart city and its infrastructures: a COVID-19 Use case. arXiv preprint arXiv:2004.09246. Apr 13. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.09246>
- Gündüz, M. Z. & Daş, R. (2018). Nesnelerin interneti: Gelişimi, bileşenleri ve uygulama alanları. *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 327-335. Erişim adresi: <http://pajes.pau.edu.tr/en/jvi.aspx?pdire=pajes&plng=eng&un=PAJES-89106&look4=>
- Hakkinen, K. (2014). Safety Management: From Basic Understanding Towards Excellence In: Seppo Väyrynen, Kari Häkkinen, Toivo Niskanen- Ed. *Integrated Occupational Safety and Health Management*, Springer. Erişim adresi: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-13180-1\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-13180-1_2)
- Hassan, S.S., Bibon, S.D., Hossain, S. & Atiquzzaman, M. (2018). Security threats in Bluetooth technology. *computers & security*, 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.03.008>
- Hinze, A., Bowen, J., & König, J. L. (2022). Wearable technology for hazardous remote environments: Smart shirt and Rugged IoT network for forestry worker health. *Smart Health*, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2021.100225>
- Jiang, D. (2020). The construction of smart city information system based on the Internet of Things and cloud computing. *Computer Communications*, 158-166. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.035>
- Javaid, M. Vaishya, R. Bahl, S. Suman, R. Vaish A. 2020. Industry 4.0 technologies and their applications in fighting COVID-19 pandemic. *Diabetes metabolic syndrome Clinical Research Reviews*”, 419-422. <https://doi.org/10.1016/>
- J. Voas, (2016). Demystifying the internet of things. 80–83. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7490326>
- Kanan, R., Elhassan, O., & Bensalem, R. (2018). An IoT-based autonomous system for workers’ safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. *Automation in Construction*. 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.033>.
- Keleş, A.E & Keleş.M.K. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanımı Artan Bilgisayar Yazılımları ve Bilgi Teknolojilerinin İrdelenmesi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*. Cilt: 5, No: 2, 610-617. <https://doi.org/10.31202/ecjse.386469>
- Khan, M., Khalid, R., Anjum, S., Khan, N., Cho, S., & Park, C. (2022). Tag and IoT based safety hook monitoring for prevention of falls from height. *Automation in Construction*, 104153. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104153>
- Khalil, E. A., & Ozdemir, S., (2018). Overview of internet of things: Concept, characteristics, challenges and opportunities. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences-Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, vol.24, no.2, 311-326. Erişim adresi: <http://pajes.pau.edu.tr/en/jvi.aspx?pdire=pajes&plng=eng&un=PAJES-60343>
- Kırkaya, A. (2015). Akıllı Tarım Teknolojileri Uygulamaları Hektaş Ar-Ge Merkezi Gebze Teknik Üniversitesi İşletme Doktora Programı All content following. *This page was uploaded by Aylin kırkaya on 04 February*. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/profile/Aylin-Kirkaya/publication/339029285\\_akıllı\\_tarım\\_teknolojileri\\_uygulamaları/links/5e398bf492851c7f7f1ce771/akıllı-tarım-teknolojileri-uygulamaları.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Aylin-Kirkaya/publication/339029285_akıllı_tarım_teknolojileri_uygulamaları/links/5e398bf492851c7f7f1ce771/akıllı-tarım-teknolojileri-uygulamaları.pdf)
- Korzak, J. & Kijewskab,K. (2019). Smart Logistics in the development of Smart Cities. 201–211. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.022>
- Kosunalp.S & Arucu, M (2018). Nesnelerin interneti ve akıllı ulaşım. 1-7. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jitsa/issue/35759/393470>



- Li, X., Chi, H., Lu, W., Xue, F., Zeng, J. & Li Zhengdao, C (2021). Federated transfer learning enabled smart work packaging for preserving personal image information of construction worker. *Automation in Construction*, 103738. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103738>
- Maciejewski, M. & Dimova, M. (2016). The ubiquitous digital single market, Fact Sheets on the European Union. Available at: [http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/en/displayFtu.html?ftuId=FTU\\_5.9.4.html](http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/en/displayFtu.html?ftuId=FTU_5.9.4.html). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103738>
- Madahana, M. C. I., Nyandoro, O. T. C. & Ekoru, J. E. D. (2020). Intelligent comprehensive Occupational health monitoring system for mine workers. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 16494–16499. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.751>
- Chebudie, A. B., Minerva, R., & Rotondi, D. (2014). Towards a definition of the Internet of Things (IoT). Retrieved, *IEEE Internet Initiative*, 1-87. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/317588072\\_Towards\\_a\\_definition\\_of\\_the\\_Internet\\_of\\_Things\\_IoT](https://www.researchgate.net/publication/317588072_Towards_a_definition_of_the_Internet_of_Things_IoT)
- Mofidi Naeini, A. & Nadeau, S. (2022). STPA systemic approach for OHS and operational risk analysis of data glove use in 4.0 assembly. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 317-331. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.09.003>
- Niewolny, D. (2019). How the Internet of Things Is Revolutionizing Healthcare. White Pap. 2013, pp. 3–5. Erişim adresi: <https://www.nxp.com/docs/en/white-paper/IOTREVHEALCARWP.pdf>.
- NPSTC , Public Safety Internet of Things (IoT), Use Case Report and Assessment Attributes. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.2100-01>
- OECD (2016). The Internet of Things: Seizing the Benefits and Addressing the Challenges. Erişim adresi: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/5jlwvzz8td0n-en.pdf?expires=1591427083&id=id&accname=guest&checksum=3D578DECF7F08571A0A1D6582733E66C>
- Oyucu, S. & Polat, H (2017). M2M ve IoT Platformları Üzerinde Prototip Uygulama Geliştirme. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri Ve Mühendisliği Dergisi* (2016 Cilt: 9 - Sayı:2) 01.07. ss.11-20. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tbbmd/issue/30339/271008>
- Öcal, H., Doğru İ. A. & Barışçı, N. (2019). Akıllı ve geleneksel giyilebilir sağlık cihazlarında nesnelerin interneti. *Politeknik Dergisi*, 695-714. Erişim adresi: <file:///Users/aybu/Downloads/10.2339-politeknik.450290-518159.pdf>
- Palanivelu, R. & Srinivasan, P.S.S. (2020). Safety and security measurement in industrial environment based on smart IOT technology based augmented data recognizing scheme. *Computer Communications*, 777–787. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.12.013>.
- Perera, S. (2017). IoT Analytics: Using Big Data to Architect IoT Erişim adresi: <http://wso2.com/whitepapers/iot-analytics-using-big-data-to-architect-iot-solutions/.pp.1-8>
- Pütz, S., Rick, V., Mertens, A., & Nitsch, V. (2022). Using IoT devices for sensor-based monitoring of employees' mental workload: Investigating managers' expectations and concerns. *Applied Ergonomics*, 102, 103739. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103739>
- Rajendran, S., Giridhar, S., Chaudhari, S. & Gupta, P. K. (2021). Technological advancements in occupational health and safety. *Measurement: Sensors*, 15, 100045. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100045>.
- Ramanathan, S., Malarvili, M. B., & Gopinath, S. C. B. (2023). Assessing respiratory complications by carbon dioxide sensing platforms: Advancements in infrared radiation technology and IoT integration. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(2), 104478. <https://doi.org/10.1016/j.arabcj.2022.104478>

- Rose K., Eldridge, S. & Chapin, L. (2015). The internet of things: An overview. *The Internet Society (ISOC)*, 1-50. Erişim adresi: [https://dl.wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48790442/ISOC-IoT-Overview-20151014\\_0-libre.pdf?1473746977=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThe+Internet+of+Things+An+Overview+Under.pdf&Expires=1712398830&Signature=ORJfuGzYkQjGynl4YOTzOiRi2YlgTVj9b9sU0RGJaqOe85u64kY-T7~dHNU7stXGu5ws6PAdeUXWZfktTSVkJvAUST0Fn~DZnIziszXrvLHu1Vl-Hxxp4Ou0ZwRXfwxa9Hpw1O0BEYMRC2Afp13XO5k3mFZJbY7iBeT1~cXHX9gTCBqI1-i-lhx9d3dEkueOyXkubBxWDHJ-Hmkpz2QC6zlhTh3lKd~d7BnYegX6~74CHlOwMRA0EvnShJjivbg19aJFnMj4bAxcVNBXuFcLczPO~ka0n7MFS1wsB8pTHJSPN8k9DXscbVA4HCwGYiG7QAV9wDFoJF67riyAd1uw\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://dl.wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48790442/ISOC-IoT-Overview-20151014_0-libre.pdf?1473746977=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DThe+Internet+of+Things+An+Overview+Under.pdf&Expires=1712398830&Signature=ORJfuGzYkQjGynl4YOTzOiRi2YlgTVj9b9sU0RGJaqOe85u64kY-T7~dHNU7stXGu5ws6PAdeUXWZfktTSVkJvAUST0Fn~DZnIziszXrvLHu1Vl-Hxxp4Ou0ZwRXfwxa9Hpw1O0BEYMRC2Afp13XO5k3mFZJbY7iBeT1~cXHX9gTCBqI1-i-lhx9d3dEkueOyXkubBxWDHJ-Hmkpz2QC6zlhTh3lKd~d7BnYegX6~74CHlOwMRA0EvnShJjivbg19aJFnMj4bAxcVNBXuFcLczPO~ka0n7MFS1wsB8pTHJSPN8k9DXscbVA4HCwGYiG7QAV9wDFoJF67riyAd1uw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- Roman, R., Najera, P. & Lopez, J. (2011). 'Securing the Internet of Things'. *IEEE Computer*, 51-58. Erişim adresi: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6017172>
- Sadeghi, S., Soltanmohammadlou, N., & Nasirzadeh, F. (2022). Applications of wireless sensor networks to improve occupational safety and health in underground mines. *Journal of Safety Research*, 8-25. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.07.016>
- Sarkar De, T. (2022). Internet of Things (IOT) and library services. *Emerald Publishing Limited*, 18-22. Erişim adresi: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/LHTN-06-2022-0079/full/html>
- Serin, G. & Çuhadar, M.T., (2015). İş Güvenliği ve Sağlığı Yönetim Sistemi. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 44-59. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tbed/issue/20936/225079>
- Song, S. & Issac, B., (2014). Analysis Of Wifi And Wimax and Wireless Network Coexistence. *International Journal of Computer Networks & Communications*, 63-78. Erişim adresi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.0721>
- Stoessl, A.J., Bhatia, KP., & Merello, M. (2020). Movement disorders in the world of COVID- 19. *Mov.Disord.Clin. Pract. In press*. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1002/mdc3.12952>
- Şişmanyazıcı, D., & Doğan, B. (2016). Nesnelerin İnternetinde Veri Madenciliği. *International Conference on Computer Science and Engineering*, Tekirdağ. 20-23 Ekim 2016 ss.420-425. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/profile/Derya-Sismanyazici/publication/308791605\\_Nesnelerin\\_Internetinde\\_Veri\\_Madenciligi\\_Data\\_Mining\\_on\\_Internet\\_of\\_Things/links/5837e32908ae3a74b49b255b/Nesnelerin-Internetinde-Veri-Madenciligi-Data-Mining-on-Internet-of-Things.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Derya-Sismanyazici/publication/308791605_Nesnelerin_Internetinde_Veri_Madenciligi_Data_Mining_on_Internet_of_Things/links/5837e32908ae3a74b49b255b/Nesnelerin-Internetinde-Veri-Madenciligi-Data-Mining-on-Internet-of-Things.pdf)
- Tanyer, A. M. & Pkeriçli, M. K. (2008). İnşaat Sektörü İçin Bilgi Teknolojilerindeki Son Gelişmeler. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 21-26. Erişim adresi: <https://izmir.imo.org.tr/Eklenti/834.insaat-sektoru-icin-bilgi-teknolojilerindeki-son-gelistmelerpdf.pdf?0>
- Teixeira, D., Ferreira, j. & Gonçalves, R. (2022). Monitoring of shop-floor workers postural stability through the use of smartsoles. *International Federation of Automatic Control (IFAC) Conference Paper*. 2234-2239. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.040>
- Turak, Y. (2015). Nesnelerin İnterneti Ve Güvenliği, Erişim adresi: <http://www.yigitturak.com/wp-content/uploads/IoTGuvenligi.pdf>
- Vicini, S., Sanna, A. & Bellini, S. (2012). A living lab for Internet of Things vending machines. *Springer, Berlin. Conference paper*, 35-43. Erişim adresi: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-28816-6\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-28816-6_4)
- Vuki'cevic, A., Ma'cuži'c, I., Djapan, M., Mili'cevic, V. & Shamina, L. (2021). Digital Training and Advanced Learning in Occupational Safety and Health Based on Modern and Affordable Technologies. *Sustainability*, 13641. <https://doi.org/10.3390/su132413641>
- Yang, L.U. (2017). Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 1-10. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>



Yang, Z., Yue, Y., Yang, Y., Peng, Y., Wang, X & W. Liu, (2011). Study and application on the architecture and key technologies for IOT. in Multimedia Technology (ICMT), *International Conference on*, 747-751. DOI: [10.1109/ICMT.2011.6002149](https://doi.org/10.1109/ICMT.2011.6002149)

Yi Lyu, A. Peng Yin, B., " Internet of Things transmission and network reliability in complex environment." *Computer Communications*, 757–763. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.11.054>

Zhan, X., Wu, W., Shen, L., Liao, W., Zhao, Z. & Xia, J. (2022). Industrial internet of things and unsupervised deep learning enabled real-time occupational safety monitoring in cold storage warehouse." *Safety Science*, 105766. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105766>

Zhang, M., Ghodrati, N., Poshdar, M., Seet, B.-C. & Yongchareon, S. (2023). A construction accident prevention system based on the Internet of Things (IoT). *Safety Science*, 106012. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106012>

Zorzenon, R., Lizarelli, F. L. & de A. Moura, D. B. A. (2022). What is the potential impact of industry 4.0 on health and safety at work?. *Safety Science*, 105802. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105802>

Xu, J., Lu, W., Wu, L., Lou, J. & Li, X. (2022). Balancing privacy and occupational safety and health in construction: A blockchain-enabled P-OSH deployment framework. *Safety Science*, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105860>

Wu, M. Lu, T. & F. Ling, (2010). Research on the architecture of Internet of things. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE)*. Washington, DC, USA: IEEE, 484. DOI: [10.1109/ICACTE.2010.5579493](https://doi.org/10.1109/ICACTE.2010.5579493)



# Journal of Turkish Operations Management

## Scheduling parallel batch processing machines: A case study in the semiconductor industry

Şeyda Topaloğlu Yıldız<sup>1\*</sup>, Ezgi Güleç<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Tınaztepe Kampüsü, Buca, İzmir  
e-mail: seyda.topaloglu@deu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6827-126X>

<sup>2</sup>Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi, Tınaztepe Kampüsü, Buca, İzmir  
e-mail: ezgigulec1994@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9409-6362>

\*Sorumlu Yazar

### Article Info

#### Article History:

Received: 06.03.2023

Revised: 16.09.2023

Accepted: 05.12.2023

#### Keywords:

batch processing,  
scheduling,  
parallel machines,  
mixed-integer programming,  
case study

### Abstract

This paper presents a mathematical programming-based solution approach for the scheduling problem of batch-processing parallel machines with eligibility constraints. A case study has been presented in the semiconductor industry, where the ovens are scheduled for the underfill cure operation of products. The case includes constraints, such as oven-product eligibility restrictions, loading constraints for the batching of products for ovens, daily production requirements, and oven capacity constraints. In this study, we also assess the difference between creating batches of a single product type or different product types to be allocated to the ovens. The case study results have shown that the proposed models, in comparison to the current situation, increase the occupancy rate of ovens. The execution of the models aids the company in gaining visibility on the scheduling of ovens and successfully managing the production plan and order commitment. The proposed models have been effective and supportive of the semiconductor company.

## 1. Introduction

In today's competitive global markets, fast growth and competitiveness are the key pillars of the industrial sector. For this reason, companies try to achieve high quality, short production time, and low cost, and they try to use all resources efficiently and provide the conditions for rapid and high-quality production.

The semiconductor industry is one of the most rapidly growing industries on the market today. This industry must manufacture many products with high volumes since many digital products in our daily lives, such as smartphones, computers, TVs, household appliances, and cars, use semiconductors. Semiconductor manufacturing has the most complex production systems because of the short life cycles of the products and the complicated processing steps. Therefore, companies in the semiconductor industry must manage their resources effectively to overcome many challenges, such as supply chain constraints, time, customer pressure, and new products.

This study examines the problem of scheduling parallel batch-processing ovens with eligibility constraints within a semiconductor company. The problem involves scheduling daily production orders for different product types on these ovens. In the current situation, five ovens are used for the underfill cure process, and magazines loaded with production orders are placed in these ovens, considering the eligibility requirements and capacity restrictions of ovens. Product batches loaded into ovens can consist of single or multiple product types.

Two novel mixed-integer programming (MIP) models are formulated to provide an optimal solution by either loading ovens, creating batches of only one product type, or different product types. The proposed models minimize the maximum cycle number run among all parallel ovens daily. The rest of the paper is organized as follows. Section 2 provides a research background on parallel batch processing scheduling problems. Section 3 describes the problem addressed in the case study. Following, section 4 provides a detailed description of the mathematical models proposed. Section 5 consists of the computational results and discussion. Finally, section 6 concludes by summarizing the gains that have been made.

## 2. Literature Review

Ikura and Gimple's (1986) study is probably the first to deal with batch processing machines (BPMs) scheduling. A BPM can process several jobs simultaneously as a batch. Once batch processing is started, the machine cannot be stopped or interrupted, which means that no product can be added or removed. The processing time of the batch is the longest processing time of all jobs in the batch. Ahmadi, Ahmadi, Dasu, and Tang (1992) addressed a class of two or three-stage flow shops in which one of the machines is a BPM. They assumed that the processing time of the BPM is the same for all jobs and provided algorithms for minimizing the mean flow time and makespan.

One of the earliest studies belongs to Lee, Uzsoy, and Martin-Vega (1992). They first presented efficient dynamic programming-based heuristics for a single BPM to minimize maximum tardiness and the number of tardy jobs and then developed heuristics for identical parallel BPMs to minimize makespan. Chandru, Lee, and Uzsoy (1993) studied the scheduling problem for minimizing total completion time on a single BPM in which the set of jobs to be scheduled belongs to several job families, and the jobs in the same family have the same processing time. They first developed a polynomial-time dynamic programming algorithm for the single-machine case and then developed heuristics for the parallel-machine case.

There is an increasing focus on scheduling problems for BPMs due to many applications in different industries, such as aircraft, textile, and food (Kempf, Uzsoy, and Wang, 1998; Baker and Trietsch, 2009; Beldar and Moghtader, 2022); a greater number of applications are found in the semiconductor industry. For instance, Uzsoy (1994) studied scheduling a single BPM driven by burn-in operations in the manufacture of semiconductors to minimize the total completion time. He developed a branch-and-bound algorithm and several heuristics and showed that heuristics could quickly find solutions close to the optimal. Kempf, Uzsoy, and Wang (1998) considered the same problem with job families, unequal job sizes, and resource constraints. They developed integer programming formulations and heuristics to minimize the total completion time and makespan. Lee and Uzsoy (1999) were interested in the scheduling problem on a single BPM with dynamic job arrivals to minimize the makespan. They developed polynomial and pseudopolynomial time algorithms for specific cases in burn-in operations. In addition, they developed efficient heuristics for the general case. Chou (2007) considered a single BPM problem for the burn-in operation where jobs have dynamic release times and unequal sizes. The author proposed a combined genetic algorithm (GA) and dynamic programming approach where GA determines the job sequence and dynamic programming identifies the batches.

Mathirajan and Sivakumar (2006), in their review work, mainly focused on semiconductor manufacturing due to the wealth of research in this industry. They examined many papers on scheduling BPMs in the semiconductor industry and classified them based on problem configurations and methodology to provide a comprehensive and categorized resource for future studies. According to their study, BPMs usually represent relevant process bottlenecks due to expensive equipment or long uninterrupted processing times; therefore, manufacturers must optimize the scheduling of these machines initially. Their review paper also notes that heuristic approaches are preferred over simulation and mathematical programming to schedule batch processing operations in the semiconductor industry.

In this paper, we are also concerned with the scheduling problem of parallel BPMs in the semiconductor industry. In particular, we give past research on scheduling parallel BPMs. Chang, Damodaran\*, and Melouk (2004) developed a simulated annealing (SA) approach to minimize makespan for identical parallel BPMs with unequal job size and processing time. Kashan, Karimi, and Jenabi (2008) proposed a hybrid GA to minimize makespan on identical parallel BPMs. Their results highlighted that the hybrid GA is more efficient than the SA algorithm.

Damodaran and Chang (2008) scheduled the parallel BPMs to test Printed Circuit Boards (PCBs) for which the processing time and the PCB dimensions are given. Each batch is formed so that the overall size of all PCBs in the batch is not larger than the capacity of the machine. The processing time per batch is the longest PCB processing time in the batch. To minimize the makespan, the authors proposed several heuristics to schedule PCBs on these parallel BPMs. The research conducted by Li, Qiao, and Wu (2009) was motivated by a scheduling problem in the dry strip operations at a semiconductor wafer manufacturing facility. The parallel BPMs with incompatible job families and dynamic job arrivals were scheduled with sequence-dependent setup time and qual-run requirements for advanced process control. They developed an ant colony optimization algorithm to achieve a satisfactory solution in a reasonable computation time.

Wang and Chou (2010) addressed the parallel BPMs scheduling problem in manufacturing environments such as the burn-in operation in the manufacture of semiconductors and the aging test operation in the manufacture of thin film transistor-liquid crystal displays (TFT-LCDs); they provided an MIP model, and metaheuristics based on GA and SA. Tai and Lai (2011) considered the liquid crystal injection scheduling problem (LCISP) for identical parallel BPMs involving constraints on limited maximum waiting times, unequal ready times, machine

setup times, and incompatible product families. The authors proposed an MIP model and efficient solution procedures. Chang, Yang, Hu, and Chen (2012) studied the scheduling problem of uniform parallel BPMs with non-identical job sizes. They provided the MIP models for minimizing makespan and total completion time; then, they provided a polynomial-time algorithm with worst-case ratio analysis.

Chou (2013) solved the scheduling of unrelated parallel BPMs with job release times and unequal job sizes to minimize the total weighted tardiness. This study proposed an MIP model and several heuristics based on dispatching rules, dynamic programming methods, and SA algorithms. Zhou, Liu, Chen, and Li (2016) addressed the scheduling problem of parallel BPMs having different speeds and capacities and arbitrary job sizes. Their paper proposed an MIP model first, then developed a differential evolution-based hybrid algorithm for solving large problem instances.

Liu, Yuan, and Li (2016) studied online scheduling of equal-length jobs on unbounded parallel BPMs to minimize makespan with the limited restart feature; that means a running task may be interrupted, losing all the work done on it, and the jobs are rescheduled from scratch with only one restart option. Arroya and Leung (2017) discussed the identical parallel BPMs with unequal job sizes and non-zero ready times and developed an MIP model and a heuristic approach. In the paper of Jia, Huo, Li, and Chen (2019), the jobs have identical processing times, non-identical sizes, and unequal weights. The jobs are delivered to the customers by the vehicles after processing. Two heuristic algorithms and an algorithm based on ant colony optimization were presented to minimize the total weighted delivery time of the jobs. Ozturk (2020) presented a decomposition method that uses column generation to schedule parallel batches of jobs on identical parallel machines with different job release dates, processing times, and sizes while machines have limited capacity. In Song's (2022) paper, the unrelated parallel BPM scheduling problem is addressed to minimize the total energy consumption and makespan. A self-adaptive multi-objective differential evolution algorithm was put forward. Recently, Nguyen and Sheen (2023) considered the parallel BPMs scheduling problem to minimize the makespan under constraints of unequal lot sizes, start time windows, and incompatible families. They developed a decomposition-based heuristic to obtain a near-optimal solution for large-scale problems. Also, Ji, Xiao, Yu, and Wu (2023) proposed a hybrid large neighborhood search utilizing the tabu strategy and local search for scheduling unrelated parallel BPMs, where the batches are limited to the jobs from the same family.

Fowler and Mönch (2022) recently surveyed the literature on parallel BPMs scheduling problems and focused on deterministic scheduling. They presented a classification of parallel batching problems, distinguishing the cases where all jobs can be used to form a batch and the others where only jobs of the same family can form a batch. Measures related to makespan, flow time, and due date were also examined, and future research directions were discussed.

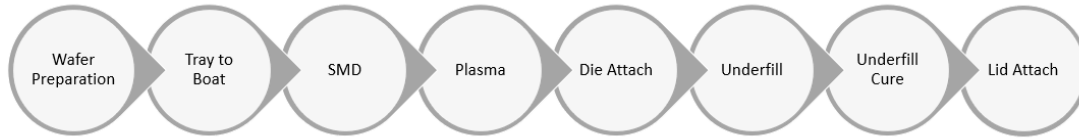
This paper differs from the studies in the literature in two points. First, in the literature, studies on scheduling batch processing in semiconductor industries are mainly related to burn-in operation or wafer fabrication. This study includes a case study for the scheduling of ovens used for an assembly process called underfill cure. Second, the proposed modeling approach is different from the existing models. Initially, an MIP model was formulated that creates batches of a single product type to be placed in the ovens. Then, this model was extended to schedule the ovens, considering the creation of batches from different product types. The developed model assigns batches loaded into the magazines to ovens. The jobs according to different product types have unequal sizes; therefore, the capacity of magazines varies according to the job sizes. The defined problem can be described as the scheduling problem of batch-processing parallel ovens with eligibility constraints. The ovens have eligibility restrictions, meaning that each job can only be processed in an eligible oven. Since the processing of batches takes equal time, the time horizon is divided into 3-h time buckets, which is the same duration for the underfill cure operation of each oven. These time buckets are considered as 3-h cyclic runs of an oven, and the ovens can operate a limited number of cycles during the day. The developed MIP models form the product batches and assign these batches to the determined cycles during the day. In this respect, the modeling approach differs from the existing MIP models. The models also determine the required number of magazines to be processed to satisfy the daily production requirements for each product. The objective function differs from the available MIP models by minimizing the maximum cycle number scheduled among the ovens with the aim of minimizing the makespan. The objective function also guarantees the consecutive scheduling of cycles for an oven throughout the day by minimizing the maximum run cycle of an oven for each batch of products.

### 3. Problem Description

The company where the case study was conducted is one of the biggest European semiconductor manufacturers and designers. It is a global high-technology company with high-volume production and produces electronic

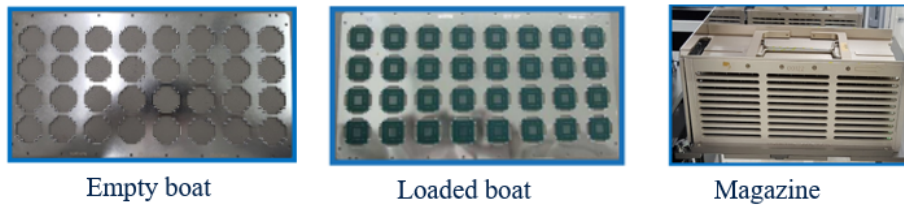
components, such as microcontrollers, integrated circuits (IC), and sensors for automotive, consumer electronics, health, communication, computer, peripheral, and industrial automation industries.

The case study focuses on the production line of Flip Chip Ball Grid Array (FCBGA) products, a mid-cost and high-performance semiconductor package. This production line produces five FCBGA products and consists of a series of the following processing steps illustrated in Figure 1.

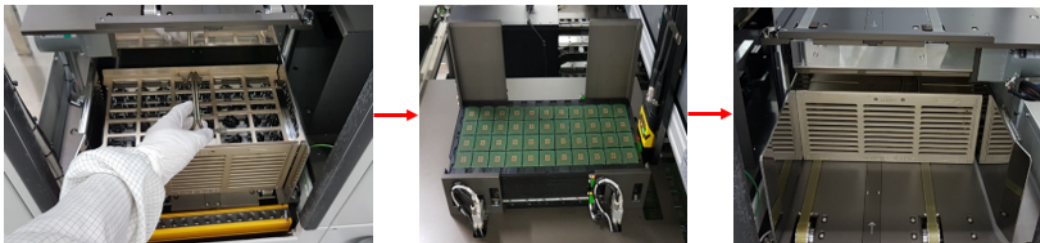


**Figure 1.** The processing steps of the production line

Wafers and substrates constitute the raw materials of this production line. "Wafer Preparation" is the first step in the production process and involves several operations, such as sawing, mounting, and laser grooving, to make it suitable for the following steps. The other raw materials, substrates, are placed on boats individually in the "Tray-to-Boat" step; then, the boats are placed on magazines for transportation throughout the remaining steps of the process. The image of an empty boat, a loaded boat, and a magazine is illustrated in Figure 2, while the "Tray-to-Boat" step is given in Figure 3.



**Figure 2.** The image of boats and magazine



**Figure 3.** The illustration of the Tray-to-Boat step

Surface Mounted Device (SMD) components are soldered on the pads of substrates in the SMD step. Then, the "Plasma" step removes epoxy, soldering, flux, and all organic contaminants from the substrate surface. Subsequently, the "Die Attach" step attaches a silicon chip (die) from the wafer skeleton to the die pad of the substrate. Next, the "Underfill" step dispenses the glue along the edge of the die attached to the substrate to create a strong bond between the die and the substrate. Afterward, the substrates proceed through the "Underfill Cure" (UC) step to be heated in the ovens to strengthen this bond with high temperature and pressure. The "Lid Attach" is the last step that places the lid cover on the top of the die to encapsulate the substrate.

Our problem is observed at the UC step of the production line. We looked at the previous step, the underfill process, to determine if it affected the UC step. Three machines are available for this process that can handle all types of products. The only machine-related constraint is that mixed products cannot be simultaneously processed on the same machine. The daily capacity for underfill machines is 80K/day regardless of product type; thus, this production line step does not constitute a bottleneck. The magazines can be directly placed in the oven as soon as the underfill step is completed; no minimum waiting time is required between these steps. On the other hand, the materials can be kept for a maximum of 3 hours in a dry box before the UC step. If they cannot be placed in the ovens before 3 hours, they are mainly scrapped through the quality department, causing a high cost to the company. For this reason, all magazines must be taken to the ovens within the specified time limit to avoid high scrap costs.

The ovens run cyclically during the workday; the UC process takes 3 hours once the ovens are started. The ovens constitute the bottleneck of the production line due to non-interrupted long processing time, eligibility restrictions regarding the product types, random placement of magazines into eligible ovens, and low capacity compared to other processes in the production line. The other important reasons why the ovens could not be used efficiently are as follows:

- Daily production quantity is determined for each product without considering the capacity of UC ovens.
- The capacity of ovens is the same in terms of the number of magazines; however, the quantities each magazine can carry are different based on product type, making the capacity control of ovens difficult.
- The maximum time between the underfill and underfill cure steps must be respected.

For this reason, providing effective scheduling for the UC process is an important management concern. We identified the problem as the scheduling problem of parallel ovens with batch processing and eligibility constraints. We developed a mathematical programming-based solution approach that helps schedule the daily required production quantities of each product on the ovens. The proposed solution approach will determine the size of the batches processed in the ovens and their sequencing according to which cycle they are assigned. In this manner, operators will place magazines depending on the scheduling decisions. In addition, the ovens will only operate for a specified number of cycles during the day instead of running all day to be available to process the completed production orders from the underfill step whenever sent.

Besides, we propose to determine the production plan of the underfill step according to the schedules of ovens since the underfill process already has enough capacity to actualize this plan. With this backward scheduling, the completed production orders from the underfill step are processed within the specified maximum time in the UC step, thus eliminating quality defects and scrap costs. As the company will have a detailed production plan for the UC bottleneck step and the previous underfill step using the proposed models in this study, the company will use the available resources efficiently and successfully manage the production plan and order commitment.

#### 4. Proposed Mathematical Model Formulations

We proposed two mixed-integer programming (MIP) models that will help improve the utilization rate of ovens by minimizing the maximum cycle number among the ovens, forming batches of magazines and assigning them to the appropriate cycles of the ovens to be treated. The main constraints that must be considered in the scheduling of ovens are the oven–product eligibility restrictions and monthly product demand. The first model (Model I) forms batches of magazines from only a single product type to load into an oven, whereas the second model (Model II) forms batches from different product types to place in the same oven. The assumptions common for both models are given as follows:

- The maximum number of cycles each oven can operate is known and is the same for all ovens.
- Each oven is run without interruption during each cycle.
- The number of magazines that can be placed in each oven is the same.
- The number of boats placed in the magazines changes according to the size of the product, making the oven capacity different for each product type.
- Eligibility requirements exist for the type of product that each oven can process.
- The maximum waiting time between the underfill and underfill cure steps is not considered because the production plan for the underfill process is made regarding the scheduling decisions of ovens obtained by the proposed model.

##### 4.1 Integer Linear Programming Formulation of Model I

The notation used to develop Model I, the objective function, and the constraints are as follows:

Indices:

- $i$  Index for the product type,  $i = 1, 2, 3, \dots, I$   
 $o$  Index for the oven,  $o = 1, 2, 3, \dots, O$   
 $c$  Index for the cycle number,  $c = 1, 2, 3, \dots, C$  (max # of cycles: 6 in our case)

Parameters:

- $K_i$  The capacity of the magazine based on product type  $i$   
 $IQ_i$  Daily ordering quantity of product type  $i$

$OT_{io}$	1, if oven $o$ is eligible for processing product type $i$ ; 0, otherwise.
$Cap$	Magazine capacity of each oven (max: nine magazines)
$M$	Big number

Decision Variables:

$X_{ioc}$	1, if product type $i$ is assigned to oven $o$ for cycle $c$ , and 0 otherwise
$P_i$	The number of magazines required for product type $i$ in line with daily planned production
$Q_{ioc}$	The number of magazines for product type $i$ assigned to oven $o$ in cycle $c$
$C_{max}$	The maximum cycle number scheduled among the ovens
$CPO_{io}$	The maximum cycle number scheduled for product type $i$ assigned to oven $o$

Objective Function:

$$\text{Min } M * C_{max} + \sum_{o=1}^O \sum_{i=1}^I CPO_{io} \quad (1)$$

Subject to:

$$x_{ioc} * c \leq C_{max} \quad \forall o, \forall c, \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ioc} \leq 1 \quad \forall o, \forall c \quad (3)$$

$$\sum_{c=1}^C x_{ioc} \leq M * OT_{io} \quad \forall i, \forall o \quad (4)$$

$$K_i * P_i \geq IQ_i \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{c=1}^C x_{ioc} * Cap \geq P_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{i,o,c+1} \leq \sum_{i=1}^I x_{ioc} \quad \forall o, \forall c, c \leq C \quad (7)$$

$$Q_{ioc} \leq Cap * x_{ioc} \quad \forall o, \forall c, \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{o=1}^O \sum_{c=1}^C Q_{ioc} = P_i \quad \forall i \quad (9)$$

$$x_{ioc} * c \leq CPO_{io} \quad \forall o, \forall c, \forall i \quad (10)$$

$$x_{ioc} \in \{0, 1\} \quad \forall i, \forall o, \forall c \quad (11)$$

$$P_i \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall i \quad (12)$$

$$Q_{ioc} \geq 0 \text{ and integer} \quad \forall i, \forall o, \forall c \quad (13)$$

By multiplying the  $C_{max}$  decision variable with a big number ( $M = 10000$ ), the objective function (1) first minimizes the maximum number of cycles ( $C_{max}$ ) scheduled considering all ovens operating, providing a preemptive optimal solution. Then, the sum of the maximum number of cycles executed for each product and oven is minimized. The first term aims to minimize the makespan, while the second term allocates products to ovens as evenly as possible. Constraint (2) ensures that the  $C_{max}$  decision variable is either equal to or greater than the cycle number of each product for each oven, thus determining the maximum cycle number scheduled among all ovens. Constraint (3) guarantees that, at most, one product type is allocated to each oven for each cycle. According to Constraint (4), a product can only be assigned to an oven if it is eligible to be processed in that oven. The big-M value is taken as six in this constraint because the number of cycles scheduled for a product in an oven cannot exceed the maximum cycle number allowed. Constraint (5) determines the number of magazines required for product type  $i$  in line with the planned production quantity. Constraint (6) ensures that the required number of magazines allocated to the ovens during the workday satisfies the planned daily production quantities for the products. The scheduled cycles of each oven must be sequential when Constraint (7) is enforced. Constraint (8) guarantees that the maximum number of magazines for each cycle does not exceed the capacity of each oven if the related product is assigned. The total number of magazines assigned to the ovens for product type  $i$  is equal to the required number of magazines for that product by Constraint (9). Constraint (10) finds the maximum cycle number run for each product type on

each oven during the workday. Constraint (11) indicates the binary variables, whereas constraints (12 -13) indicate the integer variables.

## 4.2 Integer Linear Programming Formulation of Model II

The same notation used for Model I is used for developing Model II. The differences between Model I and Model II are as follows:

Constraint (3) is omitted since more than one product type can be processed in an oven for a given cycle, forming batches of different product types. The rest of the constraints are the same. In addition, the following Constraint (14) is added to the model.

$$\sum_{i=1}^I Q_{ioc} \leq Cap \quad \forall o, \forall c \quad (14)$$

Constraint (14) guarantees that the total number of magazines comprised of different product types assigned to each oven and cycle does not exceed the oven capacity.

## 5. Case Study

In the current production, five ovens can be used for the underfill cure process, and the capacity of each oven is nine, which can have only one product type. The ovens can work 24 hours a day, but according to time studies, the Overall Equipment Efficiency (OEE) calculated for the ovens is 90%. Therefore, the ovens can work 90% of the daily working time, and the remaining 10% is allocated for engineering, maintenance, break time, loading, and unloading. Eventually, the ovens can run for 21.6 hours during the workday. The duration of required activities that need to be done by operators is listed below:

- The duration of loading magazines to the oven: 6 mins
- The duration of unloading magazines to the oven: 3 mins
- The duration of the curing process: 3 hrs

The ovens are run cyclically during the workday. Therefore, considering the times mentioned above, each oven can be scheduled to run a maximum of 7 cycles daily. Not all ovens can treat all types of products because of the different temperature, pressure, and atmospheric profiles. Each product must be allocated to an eligible oven to meet the product reliability requirements. The eligibility constraints for the ovens are listed below:

- Oven 1: This oven can process Product 1 and Product 2.
- Oven 2: This oven can process Product 1, Product 2, and Product 3.
- Oven 3: This oven can process Product 4 and Product 5.
- Oven 4: This oven can process only Product 5.
- Oven 5: This oven can process all product types.

Each boat accommodates different numbers of products due to varying product sizes, whereas each magazine can carry only five boats. Table 1 shows us how many products each magazine can carry based on product type.

**Table 1.** The number of units in a magazine based on product type

	Product Size	# Units/Boat	# Units/Magazine
Product 1	13x13	60	300
Product 2	15x15	50	250
Product 3	23x23	32	160
Product 4	23x23	32	160
Product 5	24x24	30	150

The production data for the past six months of 2022 were initially extracted from the SAP system; the daily production quantities of each product are illustrated in Table 2. According to the planning calendar of the company, every quarterly period is considered three months and 13 weeks as a standard. For this reason, the first and second months of each quarter have assumed four weeks, and the third month has five weeks, which is equivalent to 28 working days for the four-week months and 35 working days for the five-week months. If there is any shutdown



due to public holidays or scheduled maintenance, it is deduced from the working days. For instance, there are three days of public holiday in October 2022 (Month 10'22), so all product orders must be completed in 25 days.

Models I and II were run using LINGO 20.0 Optimization software for these six months based on the required daily production quantities. The recommended daily production schedules for the ovens were developed for each month, respectively. Models I and II are composed of 381 variables and 631 constraints, and it took less than one second to run the models.

**Table 2.** The daily product order quantity for the past six months

Months	# Working Days/Month	Daily Product Order Quantity				
		Product 1	Product 2	Product 3	Product 4	Product 5
Month 7'22	28	7250	5846	9907	11800	0
Month 8'22	28	6953	4450	10380	12392	0
Month 9'22	35	8750	6500	10908	9430	0
Month 10'22	25	6750	6100	11150	12402	0
Month 11'22	28	8901	6250	13519	13643	0
Month 12'22	35	7692	4286	13948	13940	0

## 5.1 Implementation of Model I

The maximum cycle number scheduled considering all the ovens operating daily ( $C_{max}$ ) and the maximum cycle number scheduled for each product processed in the assigned ovens ( $CPO_{oi}$ ) are listed in Table 3. The maximum cycle number is six. Accordingly, product 1 is last processed in Oven 1 in cycle 6 ( $CPO_{11} = 6$ ), and product 2 is last processed in Oven 1 in cycle 3 ( $CPO_{21} = 3$ ).

**Table 3.** The maximum cycle number scheduled for the products on the assigned ovens for Month 7'22

Max. Cycle Numbers	
$C_{max}$	6
$CPO_{11}$	6
$CPO_{21}$	3
$CPO_{32}$	6
$CPO_{43}$	4
$CPO_{35}$	1
$CPO_{45}$	6

Table 4 summarizes the results for the total number of magazines for each product and the number of magazines assigned to ovens and cycles. The number of products that can be placed in a magazine varies depending on the product type. The total number of magazines processed for each product ( $P_i$ ) is calculated by dividing the product's daily production quantity by the magazine's capacity for the related product type and rounding it up to a higher integer when necessary to meet the daily production requirements.

**Table 4.** The number of magazines allocated to ovens and cycles for each product in Month 7'22

Product	# Magazines/Product	# Assigned Magazines
---------	---------------------	----------------------

$P_1$	25	$Q_{114} = 9, Q_{115} = 9, Q_{116} = 7$
$P_2$	24	$Q_{211} = 9, Q_{212} = 9, Q_{213} = 6$
$P_3$	62	$Q_{321} = 9, Q_{322} = 9, Q_{323} = 9, Q_{324} = 9$ $Q_{325} = 9, Q_{326} = 8, Q_{351} = 9$
$P_4$	74	$Q_{431} = 9, Q_{432} = 9, Q_{433} = 9, Q_{434} = 9$ $Q_{452} = 9, Q_{453} = 9, Q_{454} = 9, Q_{455} = 9, Q_{456} = 2$
Total		185

The  $Q_{ioc}$  values show the assignment of magazines to ovens and cycles for each product. For instance, the daily production quantity of product 1 is 7250 units in Month 7'22, and the magazine's capacity for this product is 300; the  $P_1$  value is found to be 25 magazines. These 25 magazines are allocated as nine magazines to Oven 1 in cycle 4, 9 magazines to Oven 1 in cycle 5, and 7 magazines to Oven 1 in cycle 6. Considering all product order quantities, 185 magazines have been scheduled daily.

From the results in Table 4, the proposed schedules of ovens by Model I for Month 7'22 are illustrated in Figure 4. This Gantt chart displays the proposed daily production schedule for ovens.

Month 7 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
RESOURCES							
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 6 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 7 magazines	
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 8 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines			
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 2 magazines	

Figure 4. The Gantt chart of the proposed schedules of ovens for Month 7'22 using Model I

The schedules suggested for the ovens obtained from Model 1 for the rest of the months are illustrated in Figure 5. Oven 4 is not scheduled since it is only eligible to produce Product 5, and this product is new and will be produced after Month 3'23. If the product orders had been produced according to the obtained schedules, the ovens could have been planned more efficiently according to the needs of the production. For instance, in Month 7'22 (Figure 4), while Ovens 1, 2, and 5 would have been scheduled to work for six cycles, Oven 3 would have been scheduled for four cycles. In this way, the company would have more capacity to confirm more product orders. A similar situation may be observed for other ovens.

Month 8 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 6 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 2 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 6 magazines	
Month 9 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 3 magazines		
Oven 2	Order 2 9 magazines	Order 2 8 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 5 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 6 magazines	
Month 10 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 7 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 5 magazines	
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 7 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 6 magazines	
Month 11 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 7 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 3 magazines
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 5 magazines
Oven 4							
Oven 5	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 4 magazines	
Month 12 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 8 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 7 magazines
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 7 magazines

Figure 5. The Gantt chart of the proposed schedules of ovens for the past months using Model I

The results of Model I are summarized in Table 5 regarding the total number of magazines processed daily, the maximum cycle number of each oven run during the day, and the occupancy rates of ovens for each month. The occupancy rate of each oven is calculated by dividing the number of magazines processed by each oven by the total magazine capacity of the oven, considering the scheduled cycles during the workday. Let us calculate the occupancy rate of Oven 1 for Month 7'22. The ovens can process a maximum of 9 magazines in a cycle, so when Oven 1 works for six cycles as scheduled, it can process a maximum of 54 magazines daily. We have allocated 49 magazines to this oven for processing during the day. Thus, the occupancy rate is calculated as 91% (49/54).

**Table 5.** Summarized results for the past six months with Model I

		Oven 1	Oven 2	Oven 3	Oven 5
Month 7'22	Total number of processed magazines daily	49	53	36	47
	Occupancy rate	91%	98%	100%	87%
	Maximum cycle number	6	6	4	6
Month 8'22	Total number of processed magazines daily	42	47	45	51
	Occupancy rate	93%	87%	100%	94%
	Maximum cycle number	5	6	5	6
Month 9'22	Total number of processed magazines daily	39	53	41	51
	Occupancy rate	87%	98%	91%	94%
	Maximum cycle number	5	6	5	6
Month 10'22	Total number of processed magazines daily	48	52	45	51
	Occupancy rate	89%	96%	100%	94%
	Maximum cycle number	6	6	5	6
Month 11'22	Total number of processed magazines daily	55	63	59	49
	Occupancy rate	87%	100%	94%	91%
	Maximum cycle number	7	7	7	6
Month 12'22	Total number of processed magazines daily	44	61	54	61
	Occupancy rate	98%	97%	100%	86%
	Maximum cycle number	5	7	6	7

## 5.2 Implementation of Model II

Model II is run for the past six months' data, and the proposed schedules for each month for the ovens are displayed in Figure 6. Compared to the proposed schedule for Oven 1 for month 7'22 in Figure 4, the number of cycles scheduled is reduced to 5 from 6. This reduction has been achieved by scheduling a batch of products 1 and 4 for the second cycle of Oven 5, marked in yellow in Figure 6. The other yellow marks represent similar situations for other months and ovens. The results of Model II are summarized in Table 6. The improved cycle numbers and occupancy rates compared to those of Model I are given in bold.

Month 7 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 6 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 8 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines			
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 4 2 magazines Order 1 7 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	
Month 8 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 6 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines		
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 3 2 magazines Order 4 6 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	
Month 9 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 8 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines		
Oven 2	Order 1 3 magazines Order 3 6 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines		
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 5 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines		
Month 10 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 7 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines		
Oven 4							
Oven 5	Order 3 4 magazines Order 1 5 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 3 magazines Order 4 6 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	
Month 11 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 2 7 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 3 magazines
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines
Oven 4							
Oven 5	Order 4 5 magazines Order 3 4 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines		
Month 12 '22	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4	Cycle 5	Cycle 6	Cycle 7
Oven 1	Order 2 9 magazines	Order 2 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 9 magazines	Order 1 8 magazines		
Oven 2	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 7 magazines
Oven 3	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	
Oven 4							
Oven 5	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 3 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 9 magazines	Order 4 7 magazines

Figure 6. The Gantt chart of the proposed schedules for ovens for the past six months with Model II

**Table 6.** Summarized results for the past six months with Model II

		Oven 1	Oven 2	Oven 3	Oven 5
Month 7'22	Total number of processed magazines daily	42	53	36	54
	Occupancy Rate	<b>93%</b>	98%	100%	<b>100%</b>
	Maximum cycle number	<b>5</b>	6	4	6
Month 8'22	Total number of processed magazines daily	42	45	45	53
	Occupancy Rate	93%	<b>100%</b>	100%	<b>98%</b>
	Maximum cycle number	5	<b>5</b>	5	6
Month 9'22	Total number of processed magazines daily	53	45	41	45
	Occupancy Rate	<b>98%</b>	<b>100%</b>	91%	<b>100%</b>
	Maximum cycle number	6	<b>5</b>	5	<b>5</b>
Month 10'22	Total number of processed magazines daily	43	54	45	54
	Occupancy Rate	<b>96%</b>	<b>100%</b>	100%	<b>100%</b>
	Maximum cycle number	<b>5</b>	6	5	6
Month 11'22	Total number of processed magazines daily	55	63	63	45
	Occupancy Rate	87%	100%	<b>100%</b>	<b>100%</b>
	Maximum cycle number	7	7	7	<b>5</b>
Month 12'22	Total number of processed magazines daily	44	61	54	61
	Occupancy Rate	98%	97%	100%	<b>97%</b>
	Maximum cycle number	5	7	6	7

### 5.3 Comparison of Model I, Model II, and Past Production Decisions

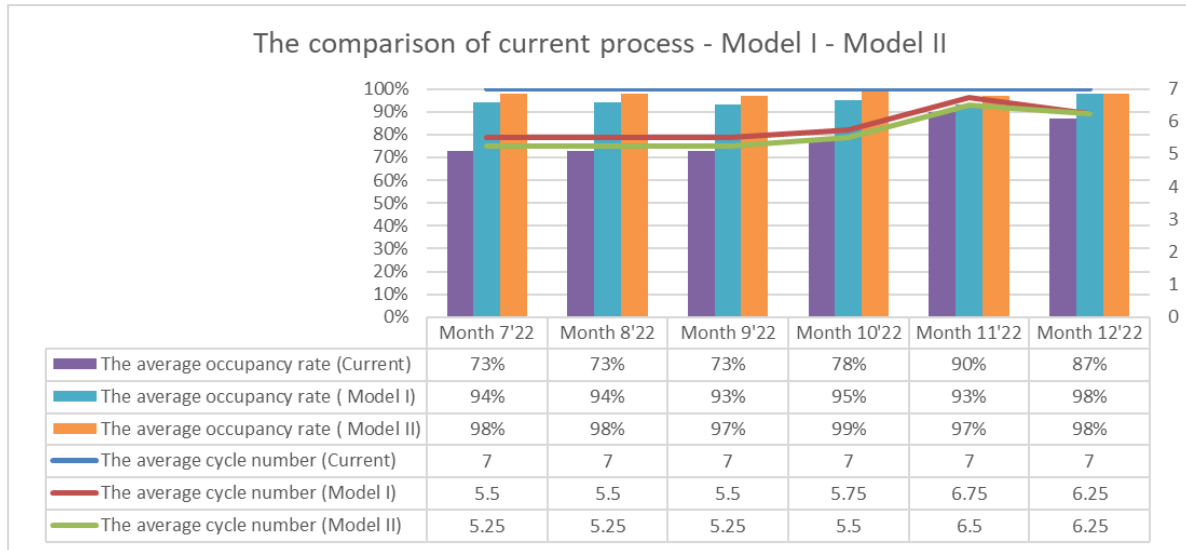
The current average occupancy rate for each oven is calculated by dividing the number of magazines processed by each oven monthly by the total magazine capacity of ovens for 7-cycle daily work during the month, as given in Table 7. In the current situation, since the production plan is unclear at the beginning of the month, the ovens must run continuously throughout the day since they require long heating times for the coming product order when stopped. For this reason, the ovens work full day even if they are not loaded with magazines. An oven can process a maximum of nine magazines in a cycle, so when it works for 7 cycles, it can process 63 magazines in a day. The monthly total magazine capacity is calculated when the daily magazine capacity is multiplied by the number of working days each month. When the monthly magazine quantity processed is divided by the monthly magazine capacity, e.g., for Month 8'22, the occupancy rate is calculated as 73% (5180/7056).

**Table 7.** The current average occupancy rate for the past six months

Month	#Working Days	# Daily Magazine Quantity Produced	# Monthly Magazine Quantity Produced	Monthly Magazine Capacity	Current Average Occupancy Rate
Month 8'22	28	185	5180	7056	73%
Month 8'22	28	185	5180	7056	73%
Month 9'22	35	184	6440	8820	73%
Month 10'22	25	196	4900	6300	78%
Month 11'22	28	226	6328	7056	90%
Month 12'22	35	220	7700	8820	87%

Figure 7 shows the results of Model I and Model II compared with the current situation as a summary. Using Model I, the average occupancy rate increases while the average number of cycles decreases. For instance, the product orders would have been completed on an average of 5.5 cycles instead of 7 cycles for Month 7'22, and

the occupancy rate would have been 94% instead of %73. With Model II, we can further improve the capacity usage. For instance, if it were possible to batch different products, the orders of Month 7'22 would have been completed on an average of 5.25 cycles, and the occupancy rate would have been 98%. This way, the company can produce more orders using capacity more efficiently.



**Figure 7.** The comparison between the current situation - Model I – Model II

## 6. Conclusion

In today's economy, rapid growth and competitiveness are on the cutting edge of the industry. Therefore, it is critical to schedule manufacturing resources efficiently. We can apply different scheduling methods for scheduling these resources for different cases in different areas of the industry. Semiconductor manufacturers need a good scheduling strategy to compete in a growing industry. Otherwise, they cannot use resources efficiently and cannot quickly respond to these demands. This study proposed new MIP models to schedule batch-processing parallel ovens with eligibility constraints for a semiconductor manufacturing company. Two MIP models have been formulated concerning the real case of this company. The first MIP model (Model I) was developed based on the restriction that only one product-type batch can be placed in the same oven for the underfill cure operation to avoid mixing between the product types. The second MIP model (Model II) was developed based on batching of different product types for increased flexibility in scheduling parallel batch processing ovens.

This paper has the following advantages for the company:

- The company can prepare the daily production schedule for ovens at the beginning of each month.
- The company can extend the production plan to the previous production step to prevent the scrap cost due to expired staging time between underfill and underfill cure operations.
- The company can manage the oven capacities more efficiently and commit to more product orders or pull-in requests.
- Model II facilitates a scheduling plan with batches of different types of products. In this way, the usage of the ovens can be increased relatively more than that of Model I.

In future research, uncertainties about daily production requirements and oven capacities can be modeled and solved using simulation-based optimization or stochastic programming.

## Contributions of Authors

**Şeyda Topaloğlu Yıldız:** Conceptualization, Supervision, Methodology, Software, Validation, Writing – original draft, **Ezgi Güleç:** Methodology, Software, Validation, Data curation, Writing - review and editing.

## Conflicts of Interest

No potential conflicts of interest were reported by the authors.

## References

- Ahmadi, J. H., Ahmadi, R. H., Dasu, S., & Tang, C. S. (1992). Batching and scheduling jobs on batch and discrete processors. *Operations research*, 40(4), 750-763.
- Arroyo, J. E. C., & Leung, J. Y. T. (2017). Scheduling unrelated parallel batch processing machines with non-identical job sizes and unequal ready times. *Computers & Operations Research*, 78, 117-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2016.08.015>
- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). Safe scheduling: Setting due dates in single machine problems. *European Journal of Operational Research*, 196(1), 69-77. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.009>
- Beldar, P., Moghtader, M., Giret, A., & Ansariipoor, A. H. (2022). Non-identical parallel machines batch processing problem with release dates, due dates and variable maintenance activity to minimize total tardiness. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108135. <http://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108135>
- Chandru, V., Lee, C. Y., & Uzsoy, R. (1993). Minimizing total completion time on a batch processing machine with job families. *Operations Research Letters*, 13(2), 61-65.
- Chang, P. Y., Damodaran\*, P., & Melouk, S. (2004). Minimizing makespan on parallel batch processing machines. *International Journal of Production Research*, 42(19), 4211-4220. <http://doi.org/10.1080/00207540410001711863>
- Cheng, B., Yang, S., Hu, X., & Chen, B. (2012). Minimizing makespan and total completion time for parallel batch processing machines with non-identical job sizes. *Applied Mathematical Modelling*, 36(7), 3161-3167. <http://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.061>
- Chou, F. D. (2007). A joint GA+ DP approach for single burn-in oven scheduling problems with makespan criterion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 587-595. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0738-5>
- Chou, F. D. (2013). Minimising the total weighted tardiness for non-identical parallel batch processing machines with job release times and non-identical job sizes. *European Journal of Industrial Engineering*, 7(5), 529-557. <http://doi.org/10.1504/EJIE.2013.057380>
- Damodaran, P., & Chang, P. Y. (2008). Heuristics to minimize makespan of parallel batch processing machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37, 1005-1013. <http://doi.org/10.1007/s00170-007-1042-8>
- Fowler, J. W., & Mönch, L. (2022). A survey of scheduling with parallel batch (p-batch) processing. *European Journal of Operational Research*, 298(1), 1-24. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.06.012>
- Ikura, Y., & Gimple, M. (1986). Efficient scheduling algorithms for a single batch processing machine. *Operations Research Letters*, 5(2), 61-65.
- Jia, Z. H., Huo, S. Y., Li, K., & Chen, H. P. (2019). Integrated scheduling on parallel batch processing machines with non-identical capacities. *Engineering Optimization*. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2019.1613388>
- Ji, B., Xiao, X., Yu, S. S., & Wu, G (2023). A Hybrid Large Neighborhood Search Method for Minimizing Makespan on unrelated Parallel Batch Processing Machines with Incompatible Job Families. *Sustainability*, 15(5), 3934. <https://doi.org/10.3390/su15053934>
- Kashan, A. H., Karimi, B., & Jenabi, M. (2008). A hybrid genetic heuristic for scheduling parallel batch processing machines with arbitrary job sizes. *Computers & Operations Research*, 35(4), 1084-1098. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2006.07.005>
- Kempf, K. G., Uzsoy, R., & Wang, C. S. (1998). Scheduling a single batch processing machine with secondary resource constraints. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(1), 37-51. [http://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80008-3](http://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80008-3)
- Lee, C. Y., Uzsoy, R., & Martin-Vega, L. A. (1992). Efficient algorithms for scheduling semiconductor burn-in operations. *Operations Research*, 40(4), 764-775.
- Lee, C. Y. (1999). Minimizing makespan on a single batch processing machine with dynamic job arrivals. *International Journal of Production Research*, 37(1), 219-236. <http://doi.org/10.1080/002075499192020>



- Li, L., Qiao, F., & Wu, Q. D. (2009). ACO-based multi-objective scheduling of parallel batch processing machines with advanced process control constraints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44, 985-994. <http://doi.org/10.1007/s00170-008-1904-8>
- Liu, H., Yuan, J., & Li, W. (2016). Online scheduling of equal length jobs on unbounded parallel batch processing machines with limited restart. *Journal of Combinatorial Optimization*, 31(4), 1609-1622. <http://doi.org/10.1007/s10878-015-9844-3>
- Mathirajan, M., & Sivakumar, A. I. (2006). A literature review, classification and simple meta-analysis on scheduling of batch processors in semiconductor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29, 990-1001. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2585-1>
- Nguyen, A. H., & Sheen, G. J. (2023). A decomposition-based heuristic algorithm for parallel batch processing problem with time window constraint. *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 30(2).
- Ozturk, O. (2020). A truncated column generation algorithm for the parallel batch scheduling problem to minimize total flow time. *European Journal of Operational Research*, 286(2), 432-443. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.044>
- Song, C. (2022). A Self-Adaptive Multiobjective Differential Evolution Algorithm for the Unrelated Parallel Batch Processing Machine Scheduling Problem. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2022/5056356>
- Tai, Y. T., & Lai, C. M. (2011). The liquid crystal injection scheduling problem (LCISP). *International Journal of Production Research*, 49(2), 467-484. <https://doi.org/10.1080/00207540903443261>
- Uzsoy, R. (1994). Scheduling a single batch processing machine with non-identical job sizes. *The International Journal of Production Research*, 32(7), 1615-1635.
- Wang, H. M., & Chou, F. D. (2010). Solving the parallel batch-processing machines with different release times, job sizes, and capacity limits by metaheuristics. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1510-1521. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.06.070>
- Zhou, S., Liu, M., Chen, H., & Li, X. (2016). An effective discrete differential evolution algorithm for scheduling uniform parallel batch processing machines with non-identical capacities and arbitrary job sizes. *International Journal of Production Economics*, 179, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.014>



# Journal of Turkish Operations Management

## Implement a process safety management system based on the identification of the most critical factors in the establishment of safety programs; using fuzzy analytic hierarchy process

Mazdak Khodadadi-Karimvand <sup>1\*</sup>, Zahra Sojoudi<sup>2</sup>, Hamidreza Zakeri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

e-mail: mazdak.kh@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-2765-3784>

<sup>2</sup>Safety Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

e-mail: zahrasjdi@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-1943-391X>

<sup>3</sup>Safety Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Science and Culture, Tehran, Iran.

e-mail: hamidrz91@gmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-3196-537X>

\*Corresponding Author

### Article Info

#### Article History:

Received: 11.04.2023

Revised: 15.08.2023

Accepted: 05.12.2023

### Keywords

Process Safety Management (PSM),  
Critical Success Factors (CSF),  
Process Safety Management System,  
Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)

### Abstract

It is essential to Identify the critical success factors due to their direct effects on the establishment of safety programs. These factors should also be prioritized to facilitate the establishment of process safety management (PSM) system in process industries. The fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) was employed in this study to weight the critical success factors in implementing and executing safety programs for establishing management system. For this purpose, a few prominent process safety management models were reviewed, and the critical success factors of safety programs establishment were extracted. After that, a questionnaire was developed and distributed among the experts. The fuzzy analytic hierarchy process was then adopted to calculate the weights of factors for prioritization. This study aimed to determine the most effective factors in implementing and improving process safety management systems in process industries. Other factors will be effected in establishing process safety management in subsequent priorities, one after another.

## 1. Introduction

At the side of the increase of the industrial revolution, technical and engineering sciences also grew and underwent tremendous adjustments, because the call for electricity providers elevated every day, requiring engineers to continuously research and expand to produce more energy resources. However the hassle right here became that with the boom of enterprise and generation, risks and fatal Commercial accidents additionally accelerated. In an overview, it can be said that the 1980s was the decade of "safety in facilities" where industries focused on improving hardware and equipment to reduce accidents. The 1990s was the decade of "process safety" that, after the "Clean Air Act" was passed in the US Congress, organizations such as the US Industrial Safety and Health Administration (OSHA) and the US Environmental Protection Agency (EPA) to reduce accidents and pollutants, they moved towards establishing models such as process safety management and risk management program (RMP) (Heidari and Ghasemi, 2016; Cheraghi and Khodadadi-Karimvand, 2023). The reason for this research is to review the Critical Success factors (CSF) in the implementation of protection packages which is the maximum essential thing in the established order of the system Safety Control system within the system industries. Analytical Hierarchy Process (AHP) can be relied upon a fantastic deal to efficacious installation a procedure safety management system.

## 2. Methodology

As mentioned in a take a look at through Ismail and Harun about the elements influencing the establishment of safety programs in operational web sites (Ismail and Harun, 2012), those CSFs can be used within the implementation of procedure safety control machine implementation ranges. In this text the CSFs in the implementation of safety Prioritization is done based on the scores given by the experts to each comparative pair. Teo et al. presented a model using the hierarchical Analytic Process method (AHP) to measure the effectiveness of the safety management system of construction sites, which mostly refers to the formulation of an audit checklist (Teo EAL, 2006).

Khodadadi-Karimvand and Taherifar, (2022) within the article "safety chance evaluation the usage of fuzzy good judgment, analysis of failure outcomes (FMEA) and Fault Tree evaluation (FTA)" addressed this difficulty to create a version for prioritizing threat and their outcomes the usage of fuzzy good judgment together with the combination of the two methods stated within the name of the thing; FMEA is a qualitative, inductive and it is effective for detecting mistakes and disasters in a machine, and fuzzy common sense can enhance that Approach with extra logical outputs. Also, FTA as a probabilistic danger evaluation method is one of the effective techniques for calculating the probability of mistakes, failure, and functionality.

In the research of Khodadadi-Karimvand and Shirouyehzad in 2021, fuzzy hierarchy is also mentioned. In this case study, using RPN, TOPSIS and FRPN techniques on the drilling operations of oil and gas wells and by integrating the FMEA method, fuzzy logic has been done. In this research, it has been tried to rank the risks by maintaining the fuzzy logical values at the level of simpler risks, and at more complex levels, helpful methods such as FTOPSIS have been used.

In other recent researches using the tools used in this paper Abdullah Zübeyr ŞEKERCİ and Nezir AYDIN, 2022, following the FAHP method, it is possible to bring the investigation closer to reality under conditions of uncertainty. Therefore, various scenarios can be examined and work can be made under conditions of uncertainty and Khodadadi-karimvand et al., 2024 used fuzzy logic for the analysis of CSFs in lean production, continued to present a conceptual model that proposed by interpretive structural modeling.

There are countless definitions of events (PSM), what is done about a program (PSM). Many similarities are observed in these definitions and basic principles, which are illustrated by the following examples:

- In the research conducted by (Norozi et al., 2013) on the feasibility of process safety management in a petrochemical unit, they found that after 6 to 10 years after the implementation of PSM, the risk of accidents decreased by 80%. After that, by adapting to OHSAS 18001 and HSE MS, most of the parameters in process safety management are consistent with these two standards.
- Naicker and Stoker defined process protection management as follows: "on every occasion there is a manner that causes modifications in temperature and stress to change the molecular shape or create new merchandise from chemicals, there may be the possibility of fire, explosion, or release of flammable or poisonous beverages." vapors, gases or current methods. The Manipulate of those undesirable activities requires a unique science called system safety management. The terms system safety and process protection control are broadly speaking used to explain the protection of employees, the public, and the surroundings from the consequence of unwanted events (Naicker K., Stoker P.W., 2014)."
- Shimada et al. have defined manner protection management as; "safety control is the process of a management gadget that focuses on stopping, getting ready for, mitigating, responding to, and remediating catastrophic releases of chemicals or resulting power (Shimada et al., 2009).
- DuPont, a global chief in Process Safety Management (PSM), said: "Process Protection Control is the usage of plans, procedures, audits, and assessments in a production or industry technique to become aware of, understand and manipulate procedure, risks, make enhancement every day in commercial enterprise and safety standards."

### 2.1 An overview of process safety management system models

In the situation of process safety management (PSM), numerous models with exclusive elements have been presented by international organizations and bodies with the purpose of paying special attention to the safety engineering approach in chemical processes. In this regard, a few PSM models are introduced.

### 2.1.1 Process Safety Management Model of the American Industrial Safety and Health Administration - OSHA<sup>1</sup>

The USA Congress established OSHA in 1970 based on the Occupational Safety and Health Act. The purpose of creating this structure became to ensure safe and healthy working conditions for employees by applying mandatory standards and providing training, counseling, education and development. The Occupational Safety and Health Agency is a part of the United States Department of hard work, and the director of the organization serves as an advisor to the Minister of Labor regarding occupational safety and health.

This employer has a national workplace, regional offices, state making plans offices and advisory offices and is actually the lawmaker of the USA. This organization is also responsible for the safety and rules of the work environment and organizes trainings, information and safety and health courses for the purpose of occupational health and creating safe conditions for employees. In order to establish safety at the process levels, this organization has provided a process safety management model.

The process safety management system within the OSHA Agency, as a national requirement at the level of American states, includes 14 elements (OSHA, 1990), which are: Table 1

**Table 1.** Elements of process safety management system OSHA.

Row	Title
1	Employee Participation
2	Operating procedures
3	Mechanical Integrity
4	Training
5	Pre-startup Safety Review
6	Incident Investigation
7	Trade Secrets
8	Process Safety Information
9	Process Hazard Analysis
10	Hot work permits
11	Contractors
12	Management of Change
13	Emergency Planning and Response
14	Compliance Audits

This model is not only specific to process industries and can be implemented in many industries such as power plants, steel industries, chemical production and other industries. Also, unlike other PSM models, it is based on federal OSHA regulations and requirements, while other models do not. The primary goal of the OSHA model is to maintain the safety of a workplace's personnel, through changing attitudes and behaviors, creating an organizational safety culture, and training to develop the necessary competencies in people who play a key role in process safety.

A safety program has been verified to be a preventive measure that can lead to stepped forward safety overall performance. Apart from that, this program can also provide a safe environment for employees and thus can help managers to prevent accidents. Since a safety program is interrelated with different dimensions of an organization, it is very important that involve related safety programs. In addition, an organization can develop a safety culture by having a safety program because it requires mutual cooperation between managers and workers (Siti Milhan. et al., 2016).

After the formulation and notification of PSM regulations, mechanisms were established to evaluate the status of the process safety management system at the level of the United States of America. Oil and gas refineries were the priority industries in which the discussion of assessing the status of the process safety management system arose in them, and in this regard, there was an instruction from the OSHA organization in which the mechanism of planning and implementation of inspections and safety assessments of the processes of oil refineries, standards and criteria such as The qualifications of engineers and industrial health and safety officers were explained.

In the appendix of this instruction, the safety management evaluation checklists of the oil refineries process were presented, the use of this appendix is mandatory for the compliance safety and health officers (CSHO). The work of these officers was gap analysis, which was done based on a series of questions. The questions were designed to evaluate and confirm process safety management in specific topics such as design, construction, installation, pre-commissioning, operation, changes, executive and engineering controls, work methods, contractor safety and other methods for refineries.

<sup>1</sup> Occupational Safety and Health Administration (OSHA)

### 2.1.2 API<sup>1</sup> process safety management model

The National Petroleum Association of America is the most prestigious center for the oil and gas industry in the USA, with more than 400 companies from very large oil corporations to the downstream sectors of the oil industry as members. These industries include oil equipment manufacturers, refineries, oil transporters by land and sea, oil storage companies.

The main purpose of forming this association was to help and cooperate with the American government and Congress in all national issues related to oil and gas, to strengthen American oil products for use inside the country or for export, and to promote attention to oil and gas industries in all fields. This association has various codes and standards in the fields and disciplines in the oil industry, such as mechanics, chemistry, electricity, precision instruments, safety and HSE, control, civil, materials and metallurgy, which is the basis of a large number of codes and standards of the National Iranian Oil Company. It is derived from these codes and standards.

In the segment on safety standards and process engineering, there are Critical standards regarding PSM. Based on this widespread numbered API-RP-750, the process safety management model of this association, which is titled process risk management, consists of 11 elements as follows Table 2: (API, 1990)

**Table 2.** Elements of process safety management system API.

Row	Title
1	Process safety information
2	Process hazards analysis
3	Management of change
4	Operating procedures
5	Safe work Practices
6	Training
7	Assurance of the quality and mechanical integrity of critical equipment
8	Pre-startup safety review
9	Emergency response and control
10	Investigation of process-related incidents
11	Audit of Process hazards management systems

The main approach in this standard is to prevent the unwanted release of toxic substances in processes. The scope of application of this standard and recommended code to all upstream and downstream petroleum industries in the United States of America that produce, refine, or store the following materials in their process is stated as follows:

- Flammable or explosive materials whose surprising and catastrophic release may create more than 5 tons of gases or vapors within a few minutes and primarily based on common failure scenarios.
- Toxic substances that have a Substance Hazard Index (SHI) greater than 5000 and are present in amounts above the threshold value at the process level.

### 2.1.3 Process Safety Management Model of the American Center for Chemical Process Safety - CCPS

After the publication of the PSM model and guidelines of the American commercial Safety and Health Organization and the private sector "American Center for Chemical Process Safety (CCPS)", based on the experience of implementing this system in various industries in different states of the United States, a more complete model was created under his own name and with centrality and basic attention to the category of risk, published as risk-based process safety management (RBPSM).

The attitude of CCPS participants in this model is that all hazards and risks in different chemical processes and facilities are not the same, therefore the financial and cost resources of organizations should be directed to the larger and more important hazards and risks.

In this model, there is a very important element of process safety culture independently, which suggests the importance that this intellectual system attaches to the safety culture in the company. Additionally, CCPS believes that the tips and experiences gained from accidents are very valuable, and using preventive and corrective measures due to the root cause of accidents can prevent the repetition of similar accidents and many other factors that cause other accidents.

Competence and ability of all relevant staff is important to the powerful implementation of PSM. It is important that all employees, including contractors, truly and completely recognize their roles and responsibilities in the PSM system, prevention and management of integrity risks and hazards. Adequate resources are essential to effectively implement PSM requirements. Management has taken all measures to ensure that the resources in the

<sup>1</sup> American Petroleum Institute (API)

asset/team are sufficient, qualified and have the necessary level of competence to deliver the PSM requirements (Mastan Shaikh, 2015).

The model provided by the American Governmental Industrial Occupational Health Conference (AIChE/CCPS), includes the following 20 elements Table 3: (CCPS, 2007)

**Table 3.** Elements of process safety management system CCPS.

Row	Title
1	Process safety culture
2	Compliance with standards
3	Process safety Competency
4	Workforce Involvement
5	Stakeholder Engagement
6	Process Safety Information
7	Hazard Identification & Risk Analysis
8	Operating Procedures
9	Safe Work Practices
10	Asset Integrity & Reliability
11	Contractor Management
12	Training
13	Management of change
14	Operational Readiness
15	Conduct of operations
16	Emergency Management
17	Incident Investigation
18	Measurement & Metrics
19	Auditing
20	Manage Review & Continuous Improve

In general, the model provided by CCPS is much richer in terms of content than other models provided by PSM, because the experiences of years of research in industrial accidents at the level of the United States of America and other countries, together with the expert safety committee in the American chemical industry, as the support of its model. Due to its specific elements, this model is much more practical in the oil, gas and petrochemical industries than the implementation in other process industries (Silaipillayarputhur and Karthik, 2018).

Process safety management system audit added in two API and CCPS models; it contributes to the goals and priorities by considering the following:

- Operational requirements
- The goals of the organization
- Risk tolerance
- Risk management requirements
- Legal requirements
- And other considerations

A detailed design of the process safety management system audit program with an effective strategy in improving the system performance will help a lot to ensure the effectiveness of PSM (David. et al., 2014).

According to the models mentioned in the research, (Chizaram et al., 2020) compared different PSM models, the results of which are collected in the following Table 4:

**Table 4.** Summary of PSM Models.

Title	CCPS	OSHA	API
Risk Identification	Process Safety Information	Process Safety Information	Process safety information
	Hazard Identification & Risk Analysis	Process Hazard Analysis	Investigation of process-related incidents
Risk Management	Contractor Management	Contractors	-
	Operating Procedures	Operating procedures	Operating procedures
	Management of change	Management of Change	Management of change
	Training	Training	Training
	Emergency Management	Emergency Planning and Response	Emergency response and control
	Conduct of operations	Pre-startup Safety Review	Pre-startup safety review

	Asset Integrity & Reliability	Mechanical Integrity	Assurance of the quality and mechanical integrity of critical equipment
	Safe Work Practices	Hot work permits	Safe work Practices
	Operational Readiness	-	-
Commitment of management and employees to process safety	Process safety culture		
	Compliance with standards	Employee Participation	-
	Process safety Competency		
	Stakeholder Engagement		
	Workforce Involvement		
	Incident Investigation	Incident Investigation	Process hazards analysis
Learn of events	Measurement & Metrics	Compliance Audits	Audit of Process hazards management systems
	Auditing	Trade Secrets	-
	Manage Review & Continuous Improve	-	-

In this study, by comparing 21 process safety management (PSM) models in various industries, they reached an integrated model called (IPSM), which is currently the latest process safety management model Table 5 (Theophilus et al., 2018, Chizaram et al., 2020).

**Table 5.** 21 Process Safety Management Models

Model	Year of design	Theory Behind Model Design	Industry for the Model	Deficiency of Model	References
Responsible Care Process Safety Code (RCPSC)	1984	It was designed to prevent the unintended release of hazardous substances by using technical improvements	Petrochemical	<ul style="list-style-type: none"> <li>It does not consider several human factors</li> <li>There is no road-map for implementation of the elements within its framework</li> </ul>	(Howard. et al., 2000)
CIMAH regulations	1984	It was designed to curb the consequences of major accidents on people and the environment	All industrial sectors except nuclear and armed-forces installations	<ul style="list-style-type: none"> <li>No safety reports</li> <li>Changes to safety management systems not addressed</li> <li>Emergency planning issues</li> </ul>	(Cassidy, 2013)
API RP 750	1990	It was designed as the first framework for managing process hazards in the oil and gas industry	Oil and Gas Petrochemical Refining	<ul style="list-style-type: none"> <li>It did not set out indicators for measuring process safety performance</li> <li>Human factors are not well addressed</li> </ul>	(COMAH, 2000)
US OSHA PSM Program	1992	It was designed to mitigate the accidental release of hazardous chemicals	Manufacturing Chemical Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>It has remained unchanged and has few human factor elements in its framework</li> </ul>	(API, 2017)
Safety Case	1992	It requires companies in offshore installations to produce a safety document to show that there is an efficient safety management system in place	Offshore	<ul style="list-style-type: none"> <li>It focuses only on paper safety and not real safety in practice.</li> <li>They are compliance-driven</li> <li>They reduce the level to which risks are being considered within organizations as they feel they already have a safety case</li> </ul>	(Beale, 2000)
ExxonMobil OIMS	1992	It was designed to improve personnel, health, security and process safety performance	Petroleum	<ul style="list-style-type: none"> <li>It is quite complex to be understood by people that are not part of the company</li> </ul>	(Belke, 2001)

				<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not certify employee compliance to standards.</li> </ul>	
ILO PSM Framework	1993	It was designed to prevent major industrial accidents in the hazardous industries	All major hazard installations except nuclear, military and transport other than pipeline	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not incorporate key human factors like safety culture into its framework</li> <li>• It does not focus on performance measurement and management review</li> </ul>	(HSE Offshore: Safety Cases, 2017)
API RP 75	1993	It was developed as a safety and environmental program for offshore operations and facilities	Oil and gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not incorporate human factors fully into its framework</li> </ul>	(ExxonMobil, 2017)
EPA RMP	1994	It was designed to monitor companies involved in the use of regulated toxic or flammable substances for prevention of accident release	Chemical Petroleum	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Human factors aren't adequately addressed</li> <li>• No certified method of implementation</li> </ul>	(CAPP, 2014)
COMAH regulations	1999	It allows competent authorities to assess the safety of designated sites using safety reports.	All hazardous industries	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cost of compliance</li> <li>• Public information may affect commercial confidentiality and site security</li> <li>• Consent for hazardous substances</li> <li>• Different attitudes to implementing the Seveso II Directive across Europe</li> </ul>	(Safety Management Systems for Major Hazard Facilities, 2011)
AICHe/CCPS Risk Based Process Safety (RBPS) Model	2007	It was designed after the Bhopal tragedy in 1984 to offer improved results with less funds and as a benchmark for the industry	Chemical Process Industries	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not address all human factors.</li> <li>• There is no road-map for implementation of the elements within its framework</li> </ul>	(Ufner and Igleheart, 2017)
BP OMS	2007	It was designed after the Deepwater Horizon blowout to ensure compliance of BP's industry standards with legislative requirements	Oil and gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not incorporate all safety management system elements in it framework</li> </ul>	(Schneider R. J. et al. 2004)
SEMS Regulation	2010	It was enacted to make mandatory the API RP 75 rule in order to enhance environmental protection and safety of offshore oil and gas activities	Offshore oil and gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not fully incorporate all human factors into its framework</li> </ul>	(API, 2004)
Energy Institute High-Level PSM Framework	2010	It was designed to provide a basic and organized approach for small and large organizations across all energy sectors	Energy industry	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Human factors are not fully integrated into the framework</li> <li>• There is no adequate route map for implementation</li> </ul>	(Yew. et al., 2014)
DuPont Operational Risk Management (ORM) Model	2010	It was initially designed to ensure safety of their facilities, but later was used as benchmark for other companies within and across various industries	Conglomerate comprising of various industrial sectors	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Its basic wheel-like structure shows no line of action or implementation of elements within its framework</li> </ul>	(Fernández-Muñiz, Montes-Peón, and Vázquez-Ordás, 2007)
CSCHE PSM Guide	2012	It was created as a more	Chemical	<ul style="list-style-type: none"> <li>• It does not consider</li> </ul>	(Amyotte,



4th edition		efficient framework for the prevention of accidents in the Canadian chemical industries		involvement of the workforce and stakeholders	2011)
				<ul style="list-style-type: none"> <li>It does not also take into account the manner in which operations are conducted.</li> </ul>	
IOGP/IPIECA OMS Framework	2014	It was designed to improve the development and application of health, safety and environmental management systems.	Oil and Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>It does not fully address human factors within its framework</li> <li>It totally relies on human compliance and does not provide enforcement actions</li> </ul>	(IOGP, 2014)
Process Safety Information Management System (PSI4MS)	2014	It was designed as an OSHA PSM compliance system for managing process chemicals, technology and equipment information in pilot plant.	Chemical	<ul style="list-style-type: none"> <li>The PSM system focuses solely on process safety information which is one of many elements in a PSM system</li> </ul>	(Aziz. et al., 2014)
Contractor Management System (CoMS)	2015	It was designed to provide a structured and easy technique to plan and implement a practical and comprehensive contractors' management system	All hazardous industries	<ul style="list-style-type: none"> <li>The PSM system focuses solely on contractor management which is one of many elements in a PSM system</li> </ul>	(Abdul Majid, Mohd Shariff, and Rusli, 2015)
Emergency Planning and Response (EPR) model	2016	It was designed to provide a structured and easy technique for organizations to plan and implement emergency planning and response based on PSM requirements	All hazardous industries	<ul style="list-style-type: none"> <li>This PSM model is solely based on emergency planning and response, which is one of many elements in a PSM system</li> </ul>	(Abdul Majid, Mohd Shariff and Mohamed Loqman S, 2016)
IPSMS model	2017	It was designed as a robust and holistic alternative to the previous PSM models by integrating their elements into one PSM system and including the human factors missing from them	Oil and Gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>This model was only validated using literature, without any input from industry professionals</li> <li>It failed to consider factors such as impact of climate change on oil and gas operations in its design</li> </ul>	(Theophilus. et al., 2018)

### 3. Critical success factors

Consistent with the definition of success by Oxford dictionaries, achievement means the completion of a goal. In fact, the success of the project means meeting everything that was expected and anticipating all the needs of the project and having enough resources on time.

CSFs is a management term for an element that is essential to the achievement of an organization or project. The definition of success factors by Rokart was published in 1979 and stated that the CSFs are really necessary for a manager to achieve his goals.

ISO 45001 occupational health and safety management system (ISO 45001) is a new worldwide standard that gives a framework for the organization to prevent and manage risks that damage employees; In this regard, it gives a safe and healthy workplace for people. ISO 45001 is intended to help organizations, irrespective of industry size,

design proactive systems, and all of its requirements are designed to integrate into an organization and prevent accidents and injuries.

CSFs in the implementation of occupational safety management in this field have been carried out in some countries, including several neighboring countries and Middle Eastern countries. It was first written in a journal in Thailand in 2008, then the same case was investigated in Malaysia and Cambodia, as well as in Saudi Arabia, Iran, Pakistan, Hong Kong, China and the United States. Based on CSFs from several countries, 13 CSF elements have been examined that have a major impact on the successful implementation of safety management. The 13 elements of CSF are given in the picture below Table 6.

Table 6. KSF Elements (13 Elements) Implementation of Work Safety Program (Anwar Ali and et al., 2019)

<b>Key Success Factors</b>	Worker Participation	Worker Motivation
		Safety Meeting
	Preventive & Control System Safety	Effective Reinforcement of Regulation
		Eligible Supervision
		Safety Equipment & Maintenance
		Safety Training
		Personnel Competence
		Program Evaluation
	Safety Regulation	Delegation, Authority, & Responsibility
		Sufficient Resources Allocation
	Management Commitment	Management Supporting
		Team Work
		Clear & Realistic Target

The main focus of this study is to search for influential factors in the successful implementation of safety management. It also shows which factors are the most important in the success of safety management in this field. By studying magazines and standards and complying with the existing conditions and after determining the variables and sampling in this field from contractors or using the results of accurate sampling conducted by occupational safety experts in this field, the analysis of the AHP mathematical method, to analyze and Ranking analysis and priority level were used. Then the inconsistencies were analyzed. These results are done with the final ranking with dominant role with analysis as the key ranking. Finally, the verification phase is carried out to check whether the ranking of the final result is related to the implementation of the project or not (Guimaraes and Lapa, 2001).

#### 4. Choosing the fuzzy membership function to complete the questionnaire and fuzzy calculations

For all Factors, five linguistic variables including (Very high, High, Moderate, low, Very low) have been used; in which 5 language variables are assigned according to the following Table 7 according to rank (Anwar Ali and Albert Eddy Husin, 2019).

Table 7. Fuzzy values of linguistic variables

Rank	Verbal Variable	Fuzzy Number
9	VH	(0.9,1,1)
7	H	(0.7,0.85,1)
5	M	(0.4,0.6,0.8)
3	L	(0.2,0.35,0.5)
1	VL	(0,0.15,0.3)

The set of values related to the set of values related to the linguistic variable = {VH, H, M, L, VL} = T(x)  
 Set change scope Range = [0,1] = U

Performing calculations with fuzzy numbers is very complicated due to their special structure, special fuzzy numbers are used in calculations to facilitate and apply them. These special numbers are bell, triangular, trapezoidal, trapezoidal L-R, triangular L-R.

\* Triangular fuzzy numbers are used in this article.

### 4.1 Prioritizing Factors

AHP became proposed by Saati in 1980 and has been significantly expanded in all areas related to decision-making in the last 20 years (Ho. W, 2008). AHP is an effective tool for analyzing complex decision problems. This method organizes the decision-making problem with a hierarchical structure at several levels. The hierarchical structure of AHP includes of the goal function (first level), criteria and sub-criteria, and decision options (last level) (Jablonsky, 2007) (Zandin, 2001). In the AHP method, the multiple criteria of the trouble are converted into the components of each option in hierarchical levels. After that, the clusters are located at the same levels through pairwise comparisons and based on information, knowledge and experience that can be investigated (Ho. W, 2008). The developmental analysis method consists of the following steps (Singh, 2016):

- 1- Breaking and building the problem hierarchy
- 2- Performing fuzzy comparisons for each of the decision criteria
- 3- Calculating the relative weight of each element in relation to every criterion
- 4- Combining the relative weights of each option and calculating the final weight

Each of the criteria of the decision matrix consists of pairwise comparisons. Pairwise comparisons are based on triangular fuzzy numbers, where the value of each element is obtained from each triangular fuzzy number from the range of 0.1111 to 9. The following relations are defined for two triangular fuzzy numbers.

$$M_1 + M_2 = (L_1 + L_2, m_1 + m_2, U_1 + U_2) \tag{1}$$

$$M_1 \times M_2 = (L_1 \times L_2, m_1 \times m_2, U_1 \times U_2) \tag{2}$$

$$M_1^{-1} = \left( \frac{1}{U_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{L_1} \right) \tag{3}$$

$$\begin{cases} V(M_1 \geq M_2) = 1, \text{if}(m_1 \geq m_2) \\ V(M_1 \geq M_2) = \frac{u_1 - l_2}{(u_1 - L_2) + (m_2 - m_1)}, \text{if}(m_1 < m_2) \end{cases} \tag{4}$$

$$C(V_1 \geq V_2, \dots, V_k) = \text{Min}(C(V_1 \geq V_2), \dots, C(V_1 \geq V_k)) \tag{5}$$

In the fuzzy hierarchy analysis process, for each row of the matrix of pairwise comparisons, the SK value, which is a triangular fuzzy number, is calculated as follows.

$$S_k = \sum_{j=1}^n M_{kj} \times \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n m_{ij} \right]^{-1} \tag{6}$$

In relation (6), K represents the row number i and j represent the rows and columns, respectively in this method, after calculating each SK, their magnitude relative to each other is obtained from relations (4 and 5), and finally, the weight of each element in the decision matrix is obtained from relation (7).

$$w'(x_i) = \text{Min} \left\{ V(S_1 \geq S_k) \right\}, K = 1, 2, \dots, n, K \neq i \tag{7}$$

The vector resulting from the weights of the criteria shown in equation (8) and it should be normalized.

$$w' = [w'(x_1), w'(x_2), \dots, w'(x_n)]^T \tag{8}$$

The weight of each choice in a hierarchical path is received by multiplying the weights of that option with respect to the elements of that path. Finally, the total weight of each option in each path determines its abnormal final

weight. The final weight of each option will be obtained by normalizing the non-normalized final weight vector. Finally, if needed, the values obtained from the matrix of pairwise comparisons can be made non-fuzzy by using the scoring method to the left and right of the fuzzy number in order to convert the fuzzy numbers (Zimmermann, 1996).

## 4.2 Prioritizing the CSFs in the establishment of process safety management

According to Table 8 and thinking about the CSFs in process management programs, we will arrive at the priorities regarding these Factors. The priority of these Factors is given in Table 7. In the implementation stage, the management plan and prioritization for CSFs are very important, although the establishment of CSFs in process industries will reduce catastrophic events; however, by applying priorities, a better result of their deployment can be seen.

**Table 8.** Result of prioritization

Row	Title
1	Management Supporting
2	Worker Motivation
3	Team Work
4	Clear & Realistic Target
5	Sufficient Resources Allocation
6	Personnel Competence
7	Delegation, Authority and Responsibility
8	Safety Meeting
9	Safety Training
10	Effective Reinforcement of Regulation
11	Safety Equipment & Maintenance
12	Eligible Supervision
13	Program Evaluation

## 5. Conclusion

The main goal of this research is to establish safety management models, after presenting the main concepts of PSM models and models in this field, it is necessary to identify and apply CSFs in establishing PSM. Therefore, by reviewing the literature, 21 cases of process safety management models were examined. Then, by examining the fuzzy logic approach, thirteen CSFs were identified according to Table 7 in establishing safety programs. These factors were prioritized with the approach of establishing process safety management. The weight of these factors was calculated by the fuzzy hierarchical analysis method, and three factors have the most importance. These three factors include management support, employee motivation and teamwork. Focusing on these factors, other factors will be effective in establishing process safety management in the next Priorities.

### Contribution of Researchers

Mazdak Khodadadi-Krimvand presented the idea and managed the research steps. Zahra Sojoudi and Hamidreza Zakeri reviewed the literature and summarized the results.

### Conflicts of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

## References

- Abdul Majid N. D., Mohd Shariff, A. and Mohamed Loqman, S. (2016). "Ensuring emergency planning & response meet the minimum Process Safety Management (PSM) standards requirements," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 40, pp. 248-258, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.12.018>.
- Abdul Majid N. D., Mohd Shariff, A., and Rusli, R. (2015). "Process Safety Management (PSM) for managing contractors in process plant," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 37, pp. 82-90, 2015/09/01/, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.014>.
- Amyotte P. R. (2011). "Are classical process safety concepts relevant to nanotechnology applications," *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 304, p. 012071, DOI: <http://10.1088/1742-6596/304/1/012071>.
- Anwar, A., Mawardi, A., and Albert, E.H. (2019). "CSFs for safety programs implementation in Indonesian construction projects", *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Vol. 10. DOI: <http://10.13140/RG.2.2.36301.49127>.
- API RP 75, Development of a Safety and Environmental Management Program for Offshore Operations and Facilities, (2004). 3<sup>rd</sup> Edition.
- API RP 750, Management of Process Hazard, (1990). 1<sup>st</sup> Edition.
- API RP 754, Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries accessed 3.20.17, (2017). Retrieved from API.
- Aziz H. A, Shariff A. M, Rusli R, and Yew K. H. (2014). "Managing process chemicals, technology and equipment information for pilot plant based on Process Safety Management standard", *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 92, No. 5, pp. 423-429, 2014/09/01/, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.011>.
- Beale, C. (2000). "Positive and Negative experience with the new COMAH Regime in the Specialty Chemicals industry", *Paper presented at the Institution of Chemical Engineers Symposium Series*.
- Belke, J.C. (2001). "Chemical accident risks in U.S. industry - A preliminary analysis of accident risk data from U.S. hazardous chemical facilities", *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*, pp. 1275-1314. DOI: [10.1016/B978-044450699-3/50041-0](https://doi.org/10.1016/B978-044450699-3/50041-0).
- Cassidy, K. (2013). "Safety Cases and the Fine Chemical Industry". *ICHEME*, 115.
- Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Process Safety Management, Regulatory Scan, (2014).
- Center for Chemical Process Safety (CCPS), Risk-Based Process Safety (RBPS), (2007).
- Cheraghi, S., and Khodadadi-Karimvand, M. (2023) "Developing and Implementation of Leading and Lagging Indicators in Process Safety Management", *Researcher*, Vol.3, No.1, pp.36-45, <https://10.55185/researcher.1286182>.
- ExxonMobil, Learn about the Operations Integrity Management System at ExxonMobil, (2017).
- Fernández-Muñiz, B., Montes-Peón, J. M., and Vázquez-Ordás, C. J. (2007). "Safety management system: Development and validation of a multidimensional scale", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 20, No.1, pp. 52-68, 2007/01/01/, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.10.002>.
- Guimaraes, A.C.F., and Lapa, C.M.F. (2001). "Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems", *Applied Soft Computing*, Vol. 7, pp. 17-28. DOI: [10.1016/j.asoc.2005.06.002](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2005.06.002).
- Health and Safety Executive (HSE). (2017). "HSE Offshore: Safety Cases".
- Heidari S. G, Ghasemi. A. (2016). "Petroleum Chemicals Industry Safety Measures", ISBN 978-600-6682-93-8, <https://libapp.uok.ac.ir/site/catalogue/216151>.

- Ho, W. (2008). "Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review", *European Journal of Operational Research*, Vol.186, No.1, pp.211-228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.004.1>.
- Howard, J., Nash, J., & Ehrenfeld, J. (2000). "Standard or Smokescreen? Implementation of a Voluntary Environmental Code. *California Management Review*", Vol.42, No.2, pp.63-82. DOI: <http://10.2307/41166033>.
- IOGP, Operating Management System Framework, (2014).
- Ismail Z, Harun Z. (2012). "Factors Influencing the implementation of a safety management system for construction sites," *safety science*, Vol.50, No.3, pp.418–423. DOI:[10.1016/j.ssci.2011.10.001](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.10.001).
- Jablonsky, J., (2007) "Measuring the efficiency of production units by AHP models", *Mathematical and Computer Modelling*, Vol.46, No.9/10, pp.1091-1098.
- Naicker K., Stoker P.W. (2014). "Effective implementation of process safety management", *The Potchefstroom Campus of the North-West University*.
- Khodadadi-Karimvand M, Shirouyehzad H, Hosseinzadeh Lotfi F. (2024), "Proposing a conceptual model of critical success factors in lean production using interpretive structural modeling and fuzzy MICMAC analysis." *Transactions on Fuzzy Sets and Systems*; 3(1): 15-28. DOI: <https://doi.org/10.30495/TFSS.2023.1999063.1087>.
- Khodadadi-Karimvand, M., & Shirouyehzad, H. (2021). Well drilling fuzzy risk assessment using fuzzy FMEA and fuzzy TOPSIS. *Journal of Fuzzy Extension and Applications*, Vol.2, No.2, 144-155. DOI: <http://10.22105/jfea.2021.275955.1086>.
- Khodadadi-Karimvand, M., & Taherifar, S. (2022). Safety Risk Assessment; Using Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis and Fault Tree Analysis. *Transactions on Fuzzy Sets and Systems*. DOI: <https://10.30495/tfss.2022.1954304.1016>.
- Mastan Shaikh. (2015). "Process Safety Management (PSM) Overview and Implementation in KOC North Kuwait Fields," *Society of Petroleum Engineers (SPE)*.
- Moore, D. A., Hazzan, M.J., Heller, D.M. Rose, M. R., David, A., Moore, M.J.H., David, M. H., and Martin R. R. (2014). "Enterprise PSM Development, Implementation, and Auditing". *AcuTech Consulting Group*, 34. DOI: <https://10.1002/prs.11690>.
- Norozi M.A., Choobineh A., Narimannejad A. (2013). "Feasibility Study of Implementing Process Safety Management (PSM) Requirements in an Iranian Petrochemical Company". *International Journal of Occupational Hygiene*, Vol.5, pp. 71-75.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 29 CFR 1910.119., (1990).
- Process Engineering. *In your plant prepared for the change from Control of Industrial Major Accident Hazards (CIMA) to Control of Major Accident Hazards (COMAH)*, (2000).
- Rockart, J.F. (1979), "Chief Executives Define Their Own Data Needs". *Harvard Business Review*, Vol. 57, pp.81-93.
- Schneider R. J. et al. (2004). "An accident waiting to happen: a spatial approach to proactive pedestrian planning," *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 36, No. 2, pp. 193-211, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(02\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(02)00149-5).
- Şekerci, A. Z. b., & Aydın, N. (2022), "A stochastic model for facility locations using the priority of fuzzy AHP". *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(3), 649-662. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/72968/1186373>.
- Shimada, Y., Kitajima, T., & Takeda, K. (2009). "Practical Framework for Process Safety Management based on Plant Lifecycle Engineering". 3rd International Conference on Integrity, Reliability& Failures, pp. 501-502.
- Seelaipillayarputhur, K. (2018). "Process safety management in manufacturing industries a review". *International Journal of Engineering & Technology*, 7(2.14), 540, DOI: <https://10.14419/ijet.v7i2.9252>.

- Singh, B. (2016). Analytical hierarchical process (AHP) and fuzzy AHP applications-A review paper. *International Journal of Pharmacy and Technology*, Vol.8, No.4, pp.4925-4946.
- Siti Milhan, M. N. a. A. F. (2016). Critical Success Factors for Safety Program Implementation among Construction Companies in Malaysia.
- Teo EAL. (2006). "Developing a model to measure the effectiveness of safety management systems of construction sites," *Building and Environ*, pp. 1584-1592.
- Theophilus, S.C., Nwankwo, C.D., Acquah-Andoh, E., Bassey, E., Umoren, U. (2018).” Integrating human factors (HF) into a process safety management system (PSMS)”. *Process Safety Progress*, Vol. 37, No. 1, pp. 67-85, DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.11909>.
- Ufner, J., Igleheart. (2017). "EPA Amends Risk Management Program (RMP) Rules for Chemical Facilities".
- Work Safe, Safety Management Systems for Major Hazard Facilities, (2011).
- Yew, K. H., Hassan, M. F., Azmi, M. S., Hanida, A., & Sujendran, S. (2014). “Software Systems in Implementation of Process Safety at Chemical Process Industry”, *IEEE*.
- Zandin, K., (2001), Maynard’s Industrial Engineering Handbook, 5<sup>th</sup> Edition, *MCGRAW-HILL*.
- Zimmermann H.J., (1996), Fuzzy Set Theory and Its Applications, 3rd Edition, *Boston: Kluwer Academic Publishers*.



# Journal of Turkish Operations Management

## State-of-the-art literature review on green finance with tabular-graphical and network analyses

Elif Haktanır<sup>a\*</sup>, Cengiz Kahraman<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Industrial Engineering, Bahcesehir University, 34349, Besiktas, Istanbul, Turkey

<sup>b</sup>Department of Industrial Engineering, Istanbul Technical University, 34367, Besiktas, Istanbul, Turkey

elif.haktaniraktas@eng.bau.edu.tr ORCID No: <http://orcid.org/> <https://orcid.org/0000-0002-3341-4360>

\*Corresponding Author

### Article Info

#### Article History:

Received: 18.09.2023  
Revised: 01.12.2023  
Accepted: 08.12.2023

#### Keywords:

Green Finance  
Green Economy  
Sustainable Development  
Environmental Protection  
Green Manufacturing  
Risk Assessment

### Abstract

Green finance is a method of financing that supports investments with a positive impact on the environment, such as the acquisition of eco-friendly goods and services as part of sustainable development or the building of eco-friendly infrastructure. Green finance has started to occupy a very important place in the literature in recent years due to the increasing sensitivity towards the environment. In this literature review, the relations of green finance with fields such as green economy, sustainable development, environmental protection, green manufacturing, and risk assessment have been examined in all aspects with the help of tables and figures. In addition, a bibliometric analysis of green finance studies' authors, publication sources, institutions, countries, subject areas, document types, and funding sponsors is presented with graphical analyses. The most widely publishing journals in the field of green finance, the most cited studies, conferences in this field, and books published on green finance are presented in tables. Instruments and components of green finance are also reviewed in detail by graphical illustrations. The literature review draws on data from Elsevier's Scopus, presenting a comprehensive analysis of publications, authors, keywords, countries, institutions, and funding sponsors in the field of green finance. Notably, China emerges as a focal point for both academic research and practical implementation of green finance initiatives. The study's outcomes not only contribute to a comprehensive understanding of existing green finance literature but also pave the way for future researchers by presenting trends, patterns, and potential areas for exploration within this critical domain.

## 1. Introduction

The increasing world population, decreasing water and underground resources, environmental and air pollution have caused the threats of global warming and climate change to become problems affecting the whole world. The uncontrolled use of fossil fuels is one of the main factors that make it difficult to implement sustainable living policies by disrupting the balance of nature. The threat of global warming, which affects the whole world, has led many countries and businesses to produce environmentally sensitive solutions. When it comes to the finance sector, we come across the concept of "green finance".

Today's unregulated and unconscious use of fossil fuels considerably raises the dangers of climate change and global warming. Therefore, it is crucial to give priority to the use of renewable energy in both business and daily life, such as solar and wind energy. Those who desire to lessen environmental pollution, carbon footprint, and hazardous gas emissions into the atmosphere can do so by using energy-saving devices. Nonetheless, it is important



to promote the use of efficient and renewable energy sources in projects, services, and goods. At this point, the concept of green financing starts to emerge.

Green finance is a concept that connects the finance and business sectors through environmentally friendly projects, products, and technologies. Green finance provides financial support for environmentally friendly projects. The primary goal of green financing projects is to create efficient, thorough, and market-driven solutions to environmental issues. It is thought that the development of environmental awareness in the world and the increase in energy need day by day will make the green finance trend a phenomenon in the long run. Because the only benefit of turning to renewable energy sources and environmentally friendly technologies in production is not the protection of nature. Studies in green finance also offer important advantages to investors that can positively affect socio-economic growth, improve their investments, and enable them to encounter new business opportunities.

In traditional methods, the only issue that affects the investment decision of the investor is the financial value of the investment, but today this approach loses its validity. In addition to economic and financial criteria, environmental and social impact, risks, and opportunities are also considered in business and investment decisions. Investors, who put sustainability and environmental protection among their priorities, now examine the companies and projects they will invest in from many different aspects. The shaping of investments within the framework of sustainability performance brings along sustainable finance practices. From the perspective of sustainability practices, investment is required to realize sustainable development, to provide smart technologies that support the environment, environmentally friendly energy systems, nature-friendly infrastructures, and information technology to support it. To long-term benefit society and the business sector, sustainable finance is a responsible financial system that includes all types of financial services that include environmental and social governance factors in company or investment decisions.

The principles, which were published in September 2019 with the participation of 130 banks, aiming to harmonize the banking sector with the United Nations Sustainable Development Goals and the Paris Climate Agreement, aiming to build a sustainable future are called "Responsible Banking Principles". These principles also provide the industry with a comprehensive framework that oversees sustainability at all levels and in all fields of activity. The United Nations Environment Program Finance Initiative has adopted the Principles of Responsible Banking, which include compliance, impact and target setting, customers, stakeholders, governance and culture, transparency, and responsibility. With the goal of sustainable development and a better future, the Principles of Responsible Banking, which set the roadmap for the banking sector all over the world, also form the basic framework of the sustainable banking system of the future. The type of banking that aims to increase environmentally friendly practices and reduce carbon footprint, takes measures to prevent waste of natural resources and works at this point is defined as "green banking". "Green investments" refer to ethical investments made in businesses that promote environmentally friendly methods and products and carry out their operations accordingly.

It may only be partially applicable for insurers to provide green financing through government loan subsidies to borrow cleaner production for environmental sustainability (Li et al., 2023). An accurate understanding and grasp of green finance's role and effect process would aid in improving policy accuracy and renewable energy development (Tang and Zhou, 2023). As a result, more research on green finance is needed to ensure its efficient use and, as a result, to determine the necessary actions. Consequently, the primary objective of this study is to analyze previous studies to identify trends and patterns in the green finance literature and to provide a route map for future researchers working on this subject. With a similar objective, Wu (2022) conducted a literature survey on trade openness, green finance, and natural resources. Their findings suggested that the exploitation of natural resources is a prerequisite for both trade openness and green finance. Ozili (2022) presented a review of the literature on green finance research around the world. Their research showed that there are a variety of issues, such as a lack of understanding and inconsistent definitions of green finance, a lack of coordination between government policies for green financing, inconsistent laws, and a lack of profitable incentives for investors and financial institutions willing to make investments in the fight against climate change. The first mixed-methods systematic review of the state-of-the-art trends in green finance research was presented by Debrah et al. (2022), with both bibliometric and qualitative analysis. Gilchrist et al. (2021) evaluated the limits of green finance with a survey of literature in the context of green bonds and green loans. Fathihani et al. (2021) reviewed 30 peer-reviewed journal articles on green and sustainable finance and summarized them in two tables. Hacıhasanoğlu (2020) reviewed the environmental Kuznets curve literature and the implications for green finance. Although there are some green finance literature studies, the goal of this study is to deal with all green finance studies statistically to show the relations between authors and keywords of green finance based on VOSviewer network graphs and to present a state-of-the-art literature review on green finance. Furthermore, whereas previous studies on green finance had a more limited scope of research areas, our study will cover all aspects of green finance.

This study aims to comprehensively explore the landscape of green finance by addressing specific research questions that delve into its intricate relationships with various sectors such as the green economy, sustainable development, environmental protection, green manufacturing, and risk assessment. The investigation further delves into the role of different financial instruments, including debt, equity, green bonds, and funds, in promoting environmental sustainability. The integration of Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria into investment decisions, the potentials and challenges associated with green finance, and the implications of the lack of standardized definitions are scrutinized. The study also examines the role of green bonds as a typical green finance tool and how consistent definitions can guide market and risk analysis effectively. Additionally, the research explores how green finance contributes to Sustainable Development Goals, environmental development, and the support for environmentally friendly technologies. The investigation concludes with an examination of the current landscape of green finance literature, focusing on distribution, authors, keywords, countries, institutions, and funding sponsors, with a particular emphasis on China's leadership in both academic research and practical implementation of green finance on a global scale.

The remaining sections of the paper are given as follows. Section 2 provides insight into green finance with related subtitles. Section 3 includes a comprehensive literature review on green finance. Sections 4 and 5 present green finance instruments and the publication media on green finance, respectively. Section 6 concludes the paper with recommendations for future study.

## 2. Green finance

Green finance is a system that encourages transforming the traditional economy through sustainable and inclusive methods. The green finance model includes sustainable development projects and initiatives, and all financial instruments used for environmental products and policies. Reducing risk perceptions and internalizing environmental externalities are the two fundamental objectives of green finance. Green finance applied on a large and economically viable scale aids in ensuring that green investments take precedence over unsustainable growth models. Green financing ensures transparency and long-term benefits from investments in environmental goals. This model is compatible and intertwined with all sustainable development criteria determined by the United Nations Sustainable Development Goals.

Green finance includes a broad range of financial services including investment, banking, and insurance. The dominant financial instruments in this financing model are debt and equity. To meet the growing demand, new financial institutions such as green banks and green funds are being established, in addition to new financial instruments such as green bonds and carbon market instruments. The most popular and in-demand green finance activities are renewable energy investments, sustainable infrastructure financing, and green bonds.

Green finance refers to investments in all financial sectors and asset classes that incorporate environmental, social, and governance (ESG) criteria into investment decisions and integrate sustainability into risk management to promote the development of a more sustainable economy. ESG information is increasingly being incorporated into the reporting processes of various actors in the investment value chain. Investors are raising difficult questions about how ESG performance is evaluated, managed, and reported as ESG reporting moves from niche to mainstream and begins to have an impact on the balance sheet. ESG data have progressed to the point where it has been adopted by the finance sector as a critical tool for identifying companies poised to succeed and those poised to underperform or fail (Lee, 2020). Challenges and opportunities, sustainable development, environmental development, and environmental technologies for green finance are the main research areas in the recent literature.

### 2.1. Potentials and challenges of green finance

The financial gap needed to meet the Sustainable Development Goals is expected to be several trillion dollars annually, even in developing nations (Johansen and Vestvik, 2020). Significant investments are required to make the switch to a low-carbon economy, and they can only be made with substantial private sector involvement. Incorporating ESG factors in private investments is moving away from risk management and toward important development and chances that produce long-term value for organizations and society (Risi, 2020). Nonetheless, several microeconomic issues have restricted capital mobilization for green projects (Desalegn and Tangl, 2022). For instance, there are maturity mismatches between investors' typically short-term time perspectives and long-term green investments. Moreover, in the past, there has frequently been a lack of coordination between economic and environmental policy approaches (Gago and Labandeira, 2010; Matzdorf and Meyer, 2014). Governments can collaborate with various stakeholders to boost capital flows and create new financial strategies across various asset classes to expand and diversify the financing of the private sector, particularly through initiatives aimed at creating capacity.

The lack of a standard definition of "green" and an accurate classification of green activities to help investors and financial institutions allocate money effectively and make educated decisions is one of the most pressing problems with green finance. The definition of green funding needs to be clearer to prevent "greenwashing" (Berensmann and Lindenberg, 2016). For market and risk analysis, benchmarking, and directing capital flows to green and sustainable initiatives, consistent minimum requirements and definitions of green finance are necessary. The development of green financial assets will be aided by disclosure requirements and regulations. There should be regulatory incentives for green financing in addition to voluntary principles and norms that are adopted and followed for all asset types.

A typical green finance tool is a green bond. A green bond is what is specified under a code of conduct. To be eligible, a bond must meet the requirements for the use of proceeds, have a procedure for project appraisal and selection, guarantee that any proceeds are managed appropriately, and offer thorough reporting.

## **2.2. Sustainable development goals and green finance**

The United Nations (UN) collaborates with countries, financial regulators, and the financial sector to align financial systems with the 2030 Agenda for sustainable development (Khan and Farooqui, 2021). It directs financial flows to help the Sustainable Development Goals to be met. Financial markets, where banks and investors allocate capital to various sectors, are at the center of today's globalized economy. Capital allocation shapes ecosystems as well as future production and consumption patterns. The three primary focuses of contemporary work on green finance include developing public-private partnerships through financing instruments like green bonds, helping the public sector create a conducive climate, and boosting the ability of community companies through microcredit.

It provides services to countries through the UN resource efficiency program to review their policies and regulatory environments for the financing system and to develop sustainable finance roadmaps. The UN intends to assist all stakeholders in local financial markets in shaping and supporting the path of multi-country policy initiatives at the sub-regional, regional, and global levels by assisting central banks in this process.

## **2.3. The role of green finance in terms of environmental development**

As global energy demand rises, so will interest in clean, environmentally friendly energy sources. The International Energy Agency (IEA) predicts that demand for renewable energy will rise by about 30% by 2030 because of global environmental regulatory policies (Scott and Gössling, 2021). Governments that act in this direction also play an important role in encouraging businesses and institutions. Companies that use renewable energy, for instance, may be able to borrow at a lower cost. Some solar energy and electric vehicle projects in European countries receive financing assistance or a tariff guarantee (Jacobs et al., 2013). Financial institutions have a significant impact on the activities of trade and industry sectors. As a result, green financing assistance provided by financial institutions is regarded as one of the most important steps taken in terms of environmental development.

## **2.4. Environmentally friendly technologies**

Environmentally friendly technology is a concept that defines economically valuable and applicable technologies that aim to consume as little water, raw materials, and energy as possible while producing as little waste as possible. Within the context of environmentally friendly technologies, "clean production" is required (Wang et al., 2017). Cleaner production also includes processes that are carried out within the framework of preventive and holistic environmental strategies to reduce environmental risks (Al-Yousfi, 2004). The following are some of the areas where environmentally friendly technologies are widely used today: sources of renewable energy, energy efficiency and savings, natural life conservation, recyclable ingredients and waste, limiting greenhouse gas emissions minimizing air and environmental pollution, utilization of plant-based products and materials, reducing raw material consumption.

## **2.5. Green financing support for environmental technologies**

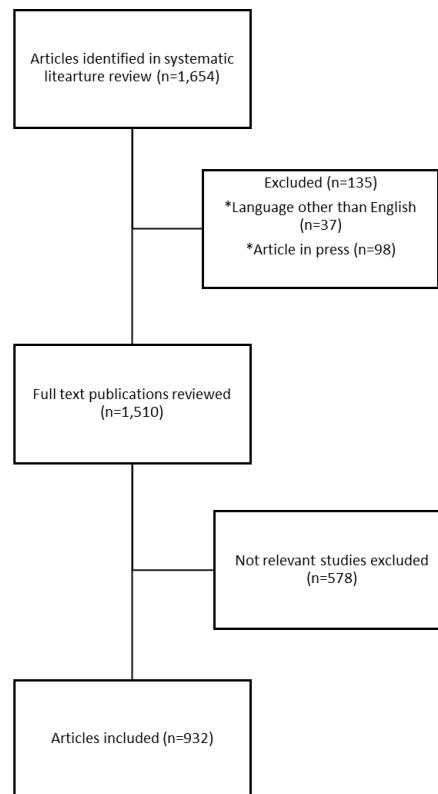
Financial institutions provide green financing support to companies that operate using environmentally friendly technologies and contribute to sustainable living (Sadiq, 2022). For example, some financial institutions offer the advantage of providing funds to companies that carry out projects on renewable energy such as wind farms, hydroelectric power plants, solar power plants, or biofuels (Hwang, 2010). It can also invest in stocks in such projects. The green financing support provided by financial institutions to companies working on environmental technologies is not limited to the advantages of providing funds. Some financial institutions can also act as guarantors for environmentally friendly products with risk-sharing (Liu and Faure, 2018). It can launch special investor product lines for products and services containing renewable and clean energy (Loock, 2012). Green public and investment funds created in the field of asset management also allow investors to support green technologies.

Green financing support provides important incentives for companies from different sectors to advance their work by sustainable living principles. Soon, it is thought that the competitiveness of companies will be determined by the sustainability performance of their activities. And yet, studies in the field of green finance are at the forefront of encouraging steps taken in this direction.

### 3. State-of-the-art literature review

To conduct a robust and systematic literature review on green finance, our research employed a multi-step methodology. The primary database utilized was Elsevier's Scopus, and a thorough search strategy involved key terms like "green finance," "sustainable development," "environmental protection," "green manufacturing," and "risk assessment" in study titles, keywords, or abstracts. Inclusion criteria necessitated a focus on green finance and its intersections with various sectors, financial instruments, Sustainable Development Goals, and environmentally friendly technologies. Studies published from 2005 onwards were considered, with an emphasis on English-language papers to ensure accessibility. Exclusion criteria were applied to filter out irrelevant or duplicated content. The selected studies were then grouped based on thematic similarities, covering categories such as green finance instruments, Sustainable Development Goals, challenges, and potentials. Data synthesis involved both quantitative analyses, like publication trends and country-wise distributions, and qualitative content analysis to extract key themes. Bibliometric analyses, including co-authorship networks and funding sponsors, were visualized using tools like VOSviewer. This comprehensive methodology enables a nuanced exploration of the current state of green finance literature, identifying trends, gaps, and suggesting avenues for future research.

Elsevier's Scopus was used as the main database in this literature study. A total of 932 studies were accessed that contain "green finance" in the study titles, keywords, or abstracts. The first of these studies was published in 2005 (Fusaro, 2005) and defined green finance as an emerging financial trend. Figure 1 presents the flow diagram of the systematic literature review.



**Figure 1.** Flow diagram of the systematic literature review.

The distribution of publications on green finance by year is displayed in Figure 2. In 2022, 476 out of the 932 articles (51%) were published. As each year went by, it was evident that there were more publications. Examining the data reveals that there have been a significant number of studies in this area, especially after 2014. The number of studies in 2023 is much fewer because the data for the study were only collected in the first quarter of 2023.

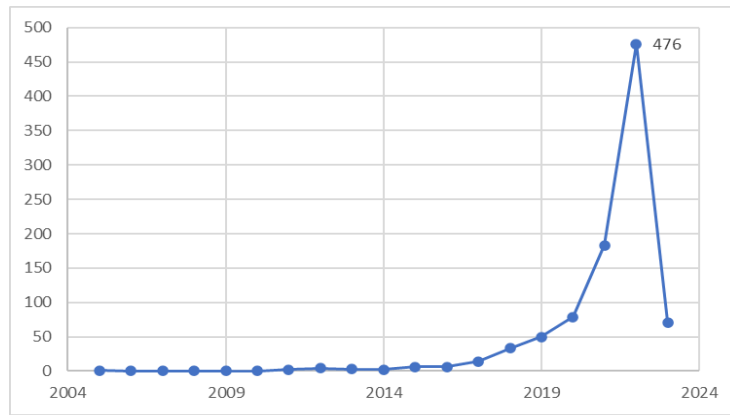


Figure 2. Green finance documents by year

Figure 3 shows the 25 countries with the highest number of publications on green finance. China has the most research and publications on green finance (n = 554). As can be seen, China has nearly half of the studies in this field which is followed by the United Kingdom (62 studies) and Pakistan (62 studies).

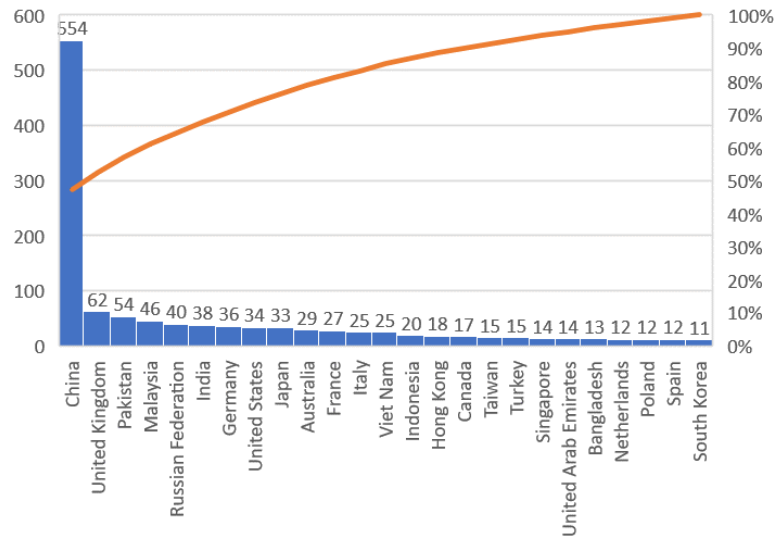


Figure 3. Documents by country

Figure 4 shows the density distribution of the countries on the world map where green finance studies have been carried out.

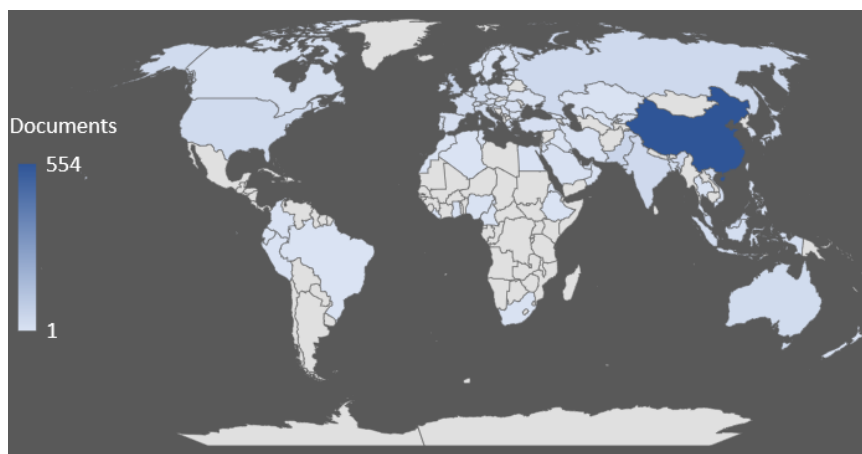


Figure 4. Density distribution of green finance studies by the countries

Figure 5 shows 16 institutions with more than 10 studies on green finance. Southwestern University of Finance and Economics has the most publications (n = 24). Following the Southwestern University of Finance and Economics are Jiangsu University and Tokai University with 21 studies.

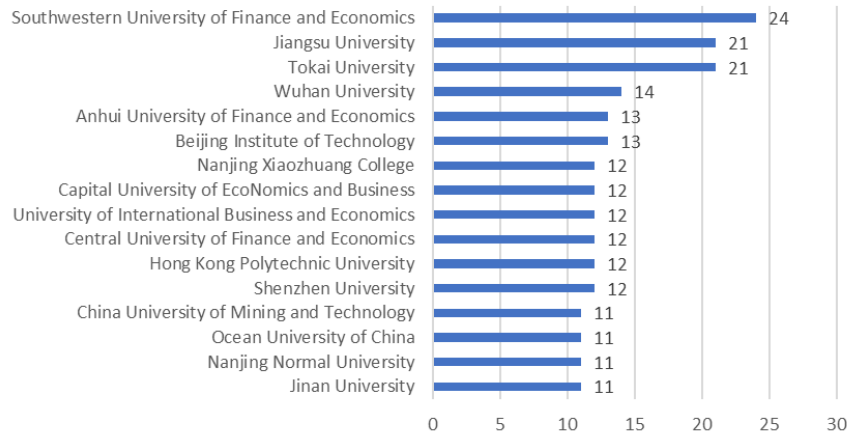


Figure 5. Documents by affiliation

A total of 3,000 keywords were found when the keywords used in green finance studies were examined. 87 keywords were categorized in this way using the criterion of a minimum of 15 repetitions of a word. As the number of repetitions rises, there are naturally fewer keywords that can be categorized. The common words found as a consequence of the research are shown in Figure 6. The terms "green finance" (847 times), "China" (232), "finance" (226 times), "sustainable development" (178 times), and "investments" (122 times) are the most often used keywords. Clusters with various color codes, such as green, yellow, red, and blue, are used to represent word groups. The frequency and quantity of repetitions in which words and colors are employed together determine their relationship.

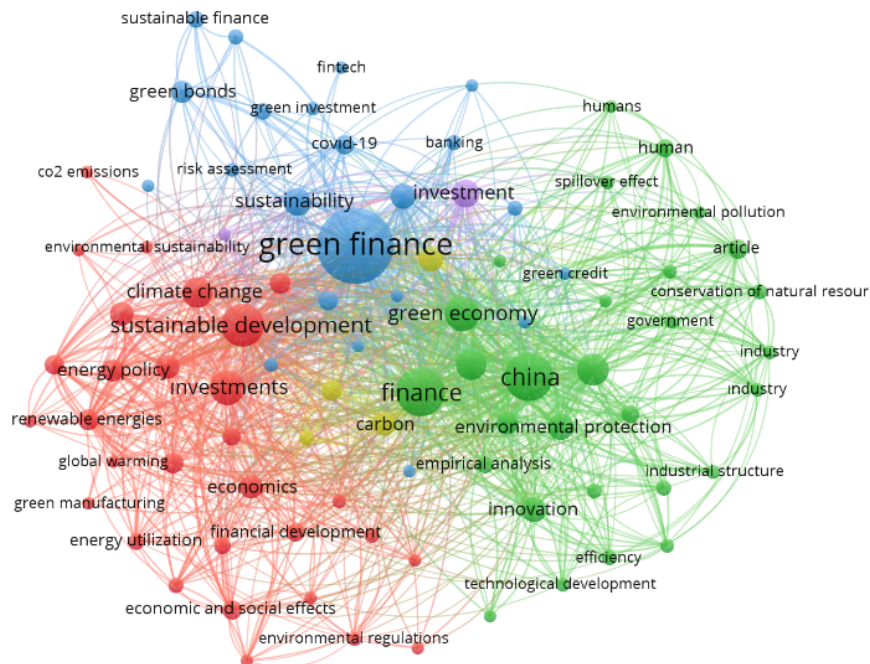


Figure 6. VOSviewer visual map of common keywords

As seen in Figure 6, three of the most common keywords used with green finance are China, sustainable development, and investment. Journal articles published in 2023, which include one of these three terms in their keywords and green finance in their titles are examined in detail in Table 1.

**Table 1.** Green finance studies with China, sustainable development, or investment keywords

Authors	Handled Problem	Considered Green Finance Issues	Analysis Technique
Tang and Zhou (2023)	Effects of green finance on the growth of renewable energy	Consistency	Spatial Panel Dobbin model
Wang et al. (2023)	Energy efficiency effects of green funding and renewable energy	Efficiency	Nonlinear autoregressive distributed lag, Two-stage least squares
Lee et al. (2023)	How green finance contributes to the economy's decarbonization	Economic decarbonization	Econometric models
Lu et al. (2023)	Security of water, electricity, and food within the limits of green finance	Sustainability	Quantitative analysis
Qin et al. (2023)	Investigating if green finance and the blockchain market can facilitate carbon neutrality	Carbon neutrality	Time-varying parameter-stochastic volatility-vector auto-regression model
Li and Umair (2023)	How sustainable growth is facilitated by green financing and renewable energy sources	Sustainable development	Cross-sectional dependency test
Gu et al. (2023)	Green finance's effects on changing energy use patterns	Green innovation	Benchmark regression model
Xu and Dong (2023)	Effects of green finance on high-quality economic growth	Economic development	Intermediary model, Regional heterogeneity analysis
Li et al. (2023)	Knowledge ecology and green finance policy governance	Cost of green development	Bibliometric and atlas analysis
Bei and Wang (2023)	Causality relationship between investments in renewable energy and green finance	Sustainability	Coherence wavelet technique
Gan and Voda (2023)	Reduction of carbon emission intensity with green finance	Low-carbon development	Panel ordinary least squares, Mediation effect, Threshold regression models
Ma (2023)	The contribution of green finance, human capital, and education to overall energy efficiency	Sustainable development	Slack-based measure method
Geng et al. (2023)	Effects of green finance and natural resource endowment	Green economic efficiency	Super-efficiency slacks-based measure model, Tobit model
Zhang et al. (2023)	Green finance, the use of renewable energy, and the extension of agricultural land	Low-carbon economy	Dynamic ordinary least squares method
Liu and Wang (2023)	Effect of green financing reform pilot zones on green innovation	Green transformation and innovation	Difference-in-difference method
Zhang et al. (2023)	Impact of innovation pilot zones and green finance reform on urban green development	Green total factor productivity	Difference-in-difference method

Huang and Khan (2023)	Government policy for early-stage green finance	Low-carbon emissions economy	Econometric model
Xia (2023)	Green finance's impact on carbon emissions	Green technology advancement	STIRPAT model
Ip et al. (2023)	Effects of urbanization and green finance on the tourism sector	Green economic development	Cross-sectional dependency ratio, Panel cointegration, and Dumitrescu-Hurlin panel causality tests
Jia (2023)	Effects of green finance on the degree of economic decarbonization	Green bond	Content analysis method
Wang (2023)	Green financing policy's effects on the manufacturing sector	Green innovation efficiency	Difference-in-difference model
Zhang et al. (2023)	Relationship between geopolitical risk and green finance	Environmental management	Time-varying causality testing
Chen et al. (2023)	Green finance and renewable energy's dynamic effects	Sustainable development	Stochastic volatile time-varying vector autoregressive model
Tiawon and Miar (2023)	The importance of generating renewable energy, energy efficiency, and green funding	Sustainable economic development	Autoregressive distributed lag model
Maria et al. (2023)	Bibliometric analysis of green finance evolution	Green transition	Structural topic modeling
Chen et al. (2023)	Options for using green technology under the cap-and-trade system	Insurer green finance	Simulation
Jiakui et al. (2023)	The contribution of green total factor productivity and green financing	Green technological innovation	Data envelopment analysis, Directional distance function
Wu (2023)	Investments in renewable energy and the impact of green financing on economic performance	Economic performance	Generalized methods of moment, Fixed-effect model
Xiang and Cao (2023)	Green finance and natural resources commodities prices	Green bond	QARDL estimation approach, Wald test, Granger causality test
Aloui et al. (2023)	Green finance and green quantitative easing effect on investors' behaviors	Green bond	Bayesian vector autoregression model

Figure 7 shows a network of collaboration among authors who have published more than five articles on green finance. 57 of the 1869 authors are divided into nine clusters, each represented by a different color. Each cluster represents a collaborative team, and the figure depicts the cluster's core authors. Most of the authors who worked closely together were from the same institution, and they mostly worked with local researchers rather than foreign researchers.



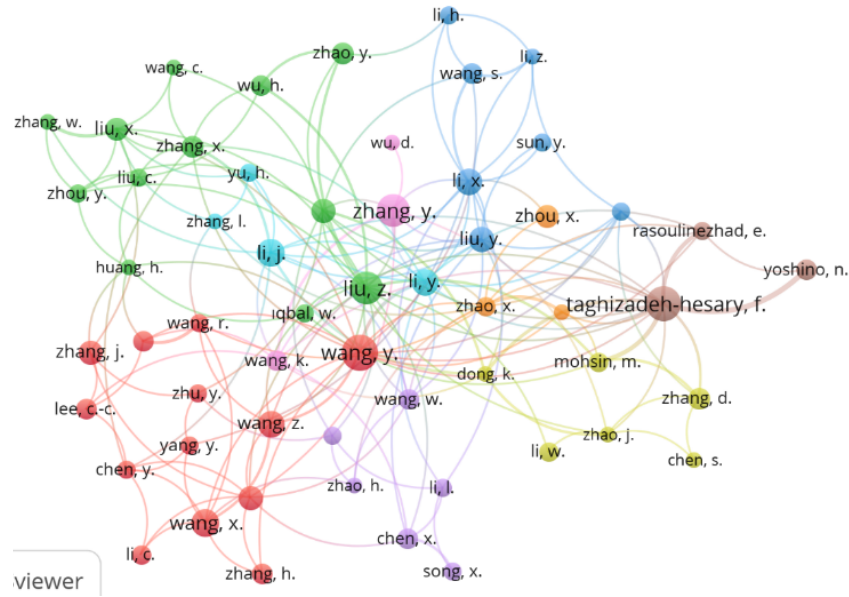


Figure 7. Co-authorship network diagram

When Figure 8, reflecting the subject areas of the studies in the field of green finance, is examined, it is seen that the most common studies are in the fields of Environmental Science (n = 437); Economics, Econometrics and Finance (n = 307); and Social Sciences (n = 247), respectively.

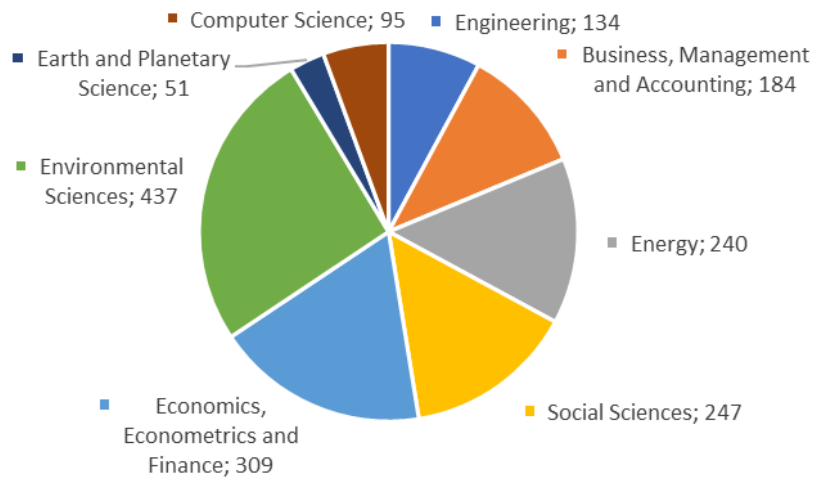


Figure 8. Documents by subject area

Figure 9 reveals that articles dominate green finance research (n = 745), followed by conference papers (n = 80), and book chapters (n= 55).

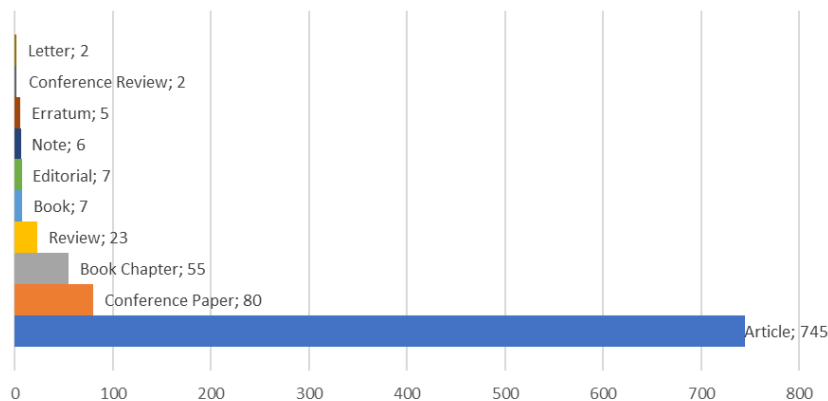


Figure 9. Documents by type

Figure 10 shows the 10 funding sponsors who provided the most financial support to the studies in the field of green finance.

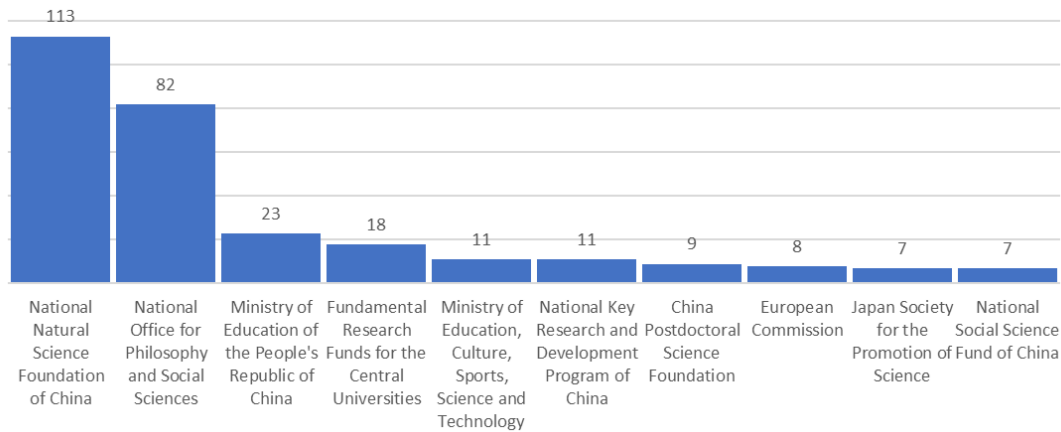


Figure 10. Documents by funding sponsor

Figures 3, 4, and 5 support the fact that the first three sponsors are of Chinese origin. In addition, the fact that one of the three most common keywords in Figure 6 is China shows that China is the leading country in the world in academic studies in the field of green finance.

#### 4. Green finance instruments

Green finance instruments are products and services that provide a channel for financial capital to environmentally friendly projects or green industrial sectors whose activities aid in the transition to a low-carbon economy (Stojanovic and Ilic, 2018) such as green credit, green security, green insurance, green investment, carbon finance, green loan, green mortgage, green fund, green index, green asset, green bond, green microfinance, and green saving (Xu and Dong, 2023; Li et al., 2022; Weber and Oni, 2015). Figure 11 shows the frequency of the studies including green finance instruments in the Scopus database. Studies with more than one green finance instrument in the title, abstract, or keywords are repeated in the figure.

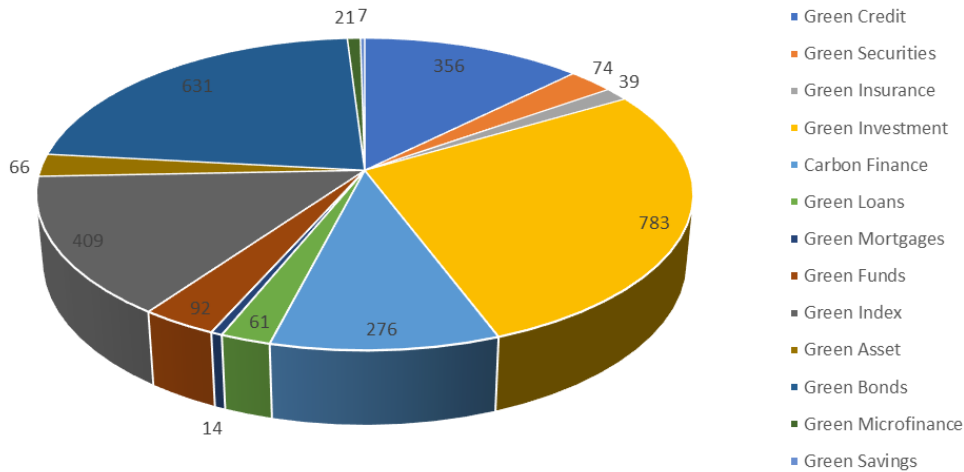


Figure 11. The frequency of the studies includes green finance instruments

When Figure 11 is examined, it is seen that the three green finance instruments that have been studied the least are green savings, green mortgage, and green microfinance, respectively and it is concluded that studies in this field can be increased and there is still a gap in the literature in these areas.

United Nations Environment Program (2017) clustered the categories of the green finance definition components into six as given in Figure 12. In the same figure, some areas of divergence and the number of studies on these areas in the Scopus database are given.

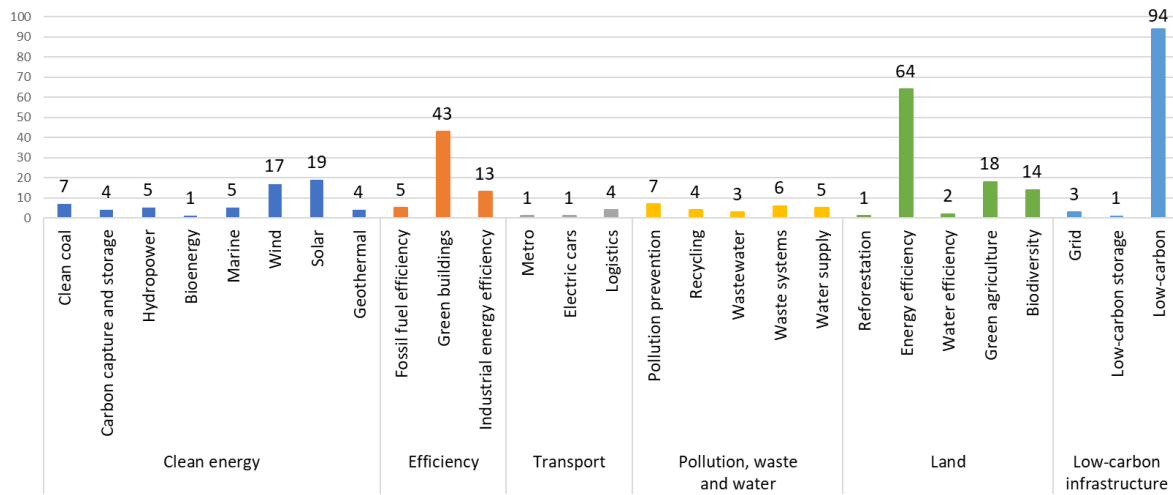


Figure 12. Components of green finance definitions

Figure 13 shows the leading countries in terms of the value of green bonds issued worldwide in 2018 (in billion U.S. dollars) (Weforum, 2019).

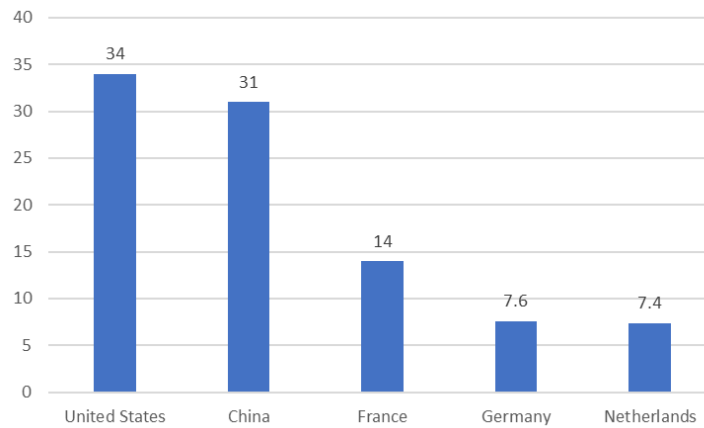


Figure 13. Value of green bond markets worldwide by major countries in 2018

The United States issued 34 billion dollars’ worth of green bonds in 2018, while China came in second with 31 billion dollars’ worth of green bonds. China is the leader in academic research on green finance, but it lags the United States in actual implementation.

### 5. Publication media on green finance

Table 2 shows the distribution of the studies by sources with more than 10 publications on green finance. In this context, 86 studies were published in the journal Environmental Science and Pollution Research. More than a total of 100 studies on green finance were published in the journals Sustainability Switzerland, Resources Policy, and Frontiers in Environmental Science. The journal with the highest rate of citations per article, based on the number of publications, is the Journal of Cleaner Production (21.1), which is ranked sixth overall. With 16.0 points, Energy Economics is in second place, followed by 15.51 points by Energies. In 14 journals, 7.9 citations per article on average were recorded. It is noteworthy that this average is lower than that of the top-ranked journal in terms of articles, Environmental Science and Pollution Research.

**Table 2.** Documents by source

Sources	Publications	Citations	Number of Citations per Article
Environmental Science and Pollution Research	86	633	7.4
Sustainability Switzerland	66	645	9.8
Resources Policy	33	251	7.6
Frontiers In Environmental Science	32	100	3.1
Renewable Energy	31	269	8.7
Journal of Cleaner Production	23	486	21.1
Energy Economics	22	351	16.0
International Journal of Environmental Research and Public Health	22	107	4.9
E3s Web of Conferences	18	34	1.9
Energies	14	211	15.1
Economic Research Ekonomska Istrazivanja	13	60	4.6
Economics Law and Institutions in Asia Pacific	13	6	0.5
Journal Of Sustainable Finance and Investment	13	116	8.9
Iop Conference Series Earth and Environmental Science	11	18	1.6

According to the number of citations, Table 3 lists the top 10 studies among the articles. The article with the most citations among those scanned in the context of the study has 266 citations and was released in Finance Research Letters. The second-placed article, which was printed in the Energy Policy journal, received 234 citations.

**Table 3.** Articles by citation

Article Content	Journal	Citation
How to encourage private investment and engagement in green financing (Taghizadeh-Hesary and Yoshino, 2019)	Finance Research Letters	266
In the BRI region, public spending and green economic growth mediated via green financing (Zhang et al., 2021)	Energy Policy	234
Impact of green financing on total green factor productivity with proof from China (Lee and Lee, 2022)	Energy Economics	173
Green finance bibliometric analysis: status, evolution, and potential directions (Zhang et al., 2019)	Finance Research Letters	170
Two features of market mechanisms and policies related to the function of green financing in environmental conservation (Wang and Zhi, 2016)	Energy Procedia	167
Demand for green finance: Overcoming China's financial barriers to green innovation (Yu et al., 2021)	Energy Policy	167
Sustainable methods for investing in renewable energy projects and using green funding (Taghizadeh-Hesary and Yoshino, 2020)	Energies	141
Can green financial development increase the effectiveness of investments in renewable energy by considering bank credit (He et al., 2019)	Renewable Energy	134

Based on Chinese provincial panel data, the effect of green finance on economic development and environmental quality (Zhou et al., 2020)	Environmental Science and Pollution Research	123
The relationship between green finance and reducing climate change in the N-11 and BRICS countries by using the difference-in-difference method (Nawaz et al., 2021)	Environmental Science and Pollution Research	114

The number of conferences and events in the field of green finance is increasing day by day. The most recent examples are the Forum on Green Finance and Investment (2022) by the OECD Center on Green Finance and Investment, the 7th Green Finance Research Advances (2022) co-organized by Banque de France and the Institut Louis Bachelier, and UK-Turkey Green Finance Conference (2022) organized by the UK Department for International Trade and the Republic of Turkey's Ministry of Treasury and Finance. In addition, events on green finance were also organized by some banks in 2022, such as The Global Green Finance Leadership Program (2022) by World Bank (Malaysia) and Green Finance Conference (2022) by The Central Bank of Hungary.

Table 4 shows the books including green finance in their titles together with their editors or authors, the year of publication, and the publishers. In this context, 11 books published between 2011 and 2023 are included in the table.

**Table 4.** Books on green finance

Editor/ Author	Book Title	Publisher
Samsul Alam, Sergey Sosnovskikh (2023)	Environmental Finance and Green Banking	Routledge
Maria Madi, Miriam Kennet (2021)	Green Investment, Green Economy and Green Finance	The Green Economics Institute
Karen Wendt (2021)	Green and Social Economy Finance	CRC Press
Simon Thompson (2021)	Green and Sustainable Finance: Principles and Practice in Banking, Investment and Insurance	Kogan Page
Aaron Ezroj (2020)	Carbon Risk and Green Finance	Routledge
Fanny M. Cheung, Hua Guo, Ying-yi Hong (2020)	Green Finance, Sustainable Development and the Belt and Road Initiative	Routledge
Jingyan Fu, Artie W. Ng (2020)	Sustainable Energy and Green Finance for a Low-carbon Economy	Springer Cham
Sang-Bing Tsai, Chung-Hua Shen, Hua Song (2019)	Green Finance for Sustainable Global Growth	IGI Global
Jeffrey D. Sachs, Wing Thye Woo, Naoyuki Yoshino, Farhad Taghizadeh-Hesary (2019)	Handbook of Green Finance	Springer Singapore
Marco Migliorelli, Philippe Dessertine (2019)	The Rise of Green Finance in Europe	Palgrave Macmillan Cham
Zongwei Luo (2011)	Green Finance and Sustainability: Environmentally-Aware Business Models and Technologies	IGI Global

## 6. Conclusion

Green finance has been one of the first areas of interest for leading countries in the field of finance. Some countries leading the way in green finance have reached billions of dollars in investments in this area. China draws attention as the leading country in the field of green finance studies. It has been observed that the publications in this field have increased exponentially since 2005. With green finance, the field of finance has expanded as a science by gaining many special terms such as green credit, green securities, green insurance, green investment, and carbon

finance. Difference-in-difference model and autoregression model are the two most widely used analytical techniques in green finance studies. United Nations Environment Program categorized the components of green finance definitions into six classes which are clean energy; efficiency; transport; pollution, waste, and water; land; and low-carbon infrastructure. Under these classes low-carbon, energy efficiency, green building, solar energy, green agriculture, wind energy, and biodiversity are the most studied areas in the literature.

The implications of the results for practice and policy in this study are substantial and hold relevance for both the financial sector and policymakers. The comprehensive review of green finance literature, encompassing topics such as sustainable development, environmental protection, and risk assessment, offers insights that can inform financial practices aligned with environmental responsibility. The identified gaps in understanding and inconsistent definitions of green finance underscore the need for standardized frameworks and definitions to prevent "greenwashing" and enhance the effectiveness of investments in the fight against climate change. The prominence of China in both academic research and financial investments in green finance suggests a global leadership role in shaping sustainable financial practices. For practitioners, the study emphasizes the importance of incorporating environmental, social, and governance (ESG) criteria into investment decisions, aligning with the United Nations Sustainable Development Goals. Policymakers can benefit from the findings by fostering regulatory incentives for green financing, ensuring transparency, and promoting consistency in defining and categorizing green activities. The study's insights provide a roadmap for practitioners and policymakers to navigate the evolving landscape of green finance, contributing to a more sustainable and environmentally conscious financial ecosystem.

Several limitations are inherent in the review processes of this study. First, the reliance on Elsevier's Scopus database may introduce a publication limitation, as it represents only one source of academic literature. The exclusion of other databases may cause missing some contributions in the field of green finance. Additionally, the study's cutoff date in the first quarter of 2023 may not capture the most recent developments in the rest of the year. The categorization of keywords and the identification of clusters using VOSviewer, while valuable for visualization, may oversimplify the complexity of green finance literature.

Future research in the field of green finance could build upon the foundations laid by this comprehensive literature review. First and foremost, there is a need for in-depth investigations into specific green finance instruments that have received relatively less attention, such as green savings, green mortgage, and green microfinance. Exploring these areas could provide nuanced insights into the financial mechanisms contributing to environmental sustainability. Additionally, researchers should delve into the practical implications of green finance policies and principles, evaluating their effectiveness in promoting sustainable practices across various sectors. As green finance gains momentum globally, comparative studies analyzing the implementation and impact of green finance initiatives in different countries would be invaluable. Furthermore, incorporating a more extensive range of databases and including gray literature in future reviews could offer a more comprehensive understanding of the evolving landscape of green finance research. Lastly, exploring the synergies between green finance and emerging technologies, such as blockchain and artificial intelligence, could uncover innovative approaches to address environmental challenges. These avenues for future research would contribute to a deeper understanding of green finance dynamics, fostering the development of more effective policies and practices for sustainable financial systems.

### **Contribution of Researchers**

Both authors have contributed equally to the work.

### **Conflicts of Interest**

The authors declared that there is no conflict of interest.

### **REFERENCES**

- Alam, S., & Sosnovskikh, S. (Eds.). (2023). *Environmental finance and green banking: Contemporary and emerging issues*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003206194>
- Aloui, D., Benkraiem, R., Guesmi, K., & Vigne, S. (2023). The European Central Bank and green finance: How would the green quantitative easing affect the investors' behavior during times of crisis?. *International Review of Financial Analysis* 85, 102464. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2022.102464>
- Al-Yousfi, A.B. (2004). Cleaner production for sustainable industrial development: concept and applications. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management* 8(4), 265-273. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2004\)8:4\(265\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2004)8:4(265))

- Berensmann, K., & Lindenberg, N. (2016). Green finance: actors, challenges and policy recommendations. German Development Institute Briefing Paper 23/2016. <https://www.econstor.eu/handle/10419/199787>
- Bei, J., & Wang, C. (2023). Renewable energy resources and sustainable development goals: Evidence based on green finance, clean energy and environmentally friendly investment. *Resources Policy* 80, 103194. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103194>
- Chen, J., Li, L., Yang, D., & Wang, Z. (2023). The dynamic impact of green finance and renewable energy on sustainable development in China. *Frontiers in Environmental Science* 10, 1097181. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1097181>
- Chen, S., Huang, F.W., Lin, J.H. (2023). Green technology choices under the cap-and-trade mechanism with insurer green finance in a dragon-king environment. *Energy Economics* 117, 106490. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106490>
- Cheung, F.M., & Hong, Y.Y. (Eds.). (2020). Green finance, sustainable development and the belt and road initiative (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003021667>
- Debrah, C., Darko, A., & Chan, A.P.C. (2022). A bibliometric-qualitative literature review of green finance gap and future research directions. *Climate and Development* 15(5), 432-455. <https://doi.org/10.1080/17565529.2022.2095331>
- Desalegn, D., & Tangl, A. (2022). Enhancing green finance for inclusive green growth: A systematic approach. *Sustainability* 14(12), 7416. <https://doi.org/10.3390/su14127416>
- Ezroj, A. (2020). Carbon Risk and Green Finance (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003095996>
- Fathihani, Saputra, J., Haat, M.H.C., Yusliza, M.Y., Muhammad, Z., & Bon, A.T. (2021). A review of sustainable green finance literature: Mini-review approach. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 3194-3207. <https://doi.org/10.46254/AN11.20210573>
- Fu, J., & Ng, A.W. (Eds.). (2020). Sustainable energy and green finance for a low-carbon economy. Springer Cham. <https://www.springerprofessional.de/en/sustainable-energy-and-green-finance-for-a-low-carbon-economy/17535004>
- Fusaro, P.C. (2005). Green trading: Convergence of the capital markets and the environment. In *Green Trading Markets* (pp. 1-14). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-008044695-0/50004-5>
- Gago, A., & Labandeira, X. (2010). Towards a green tax reform model. *Journal of Environmental Policy & Planning* 2(1), 25-37. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-7200\(200001/03\)2:1<25::AID-JEPP39>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-7200(200001/03)2:1<25::AID-JEPP39>3.0.CO;2-N)
- Gan, C., & Voda, M. (2023). Can green finance reduce carbon emission intensity? Mechanism and threshold effect. *Environmental Science and Pollution Research* 30(1), 640-653. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22176-9>
- Geng, Q., Wang, Y., & Wang, X. (2023). The impact of natural resource endowment and green finance on green economic efficiency in the context of COP26. *Resources Policy* 80, 103246. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103246>
- Gilchrist, D., Yu, J., & Zhong, R. (2021). The limits of green finance: A survey of literature in the context of green bonds and green loans. *Sustainability (Switzerland)* 13(2), 1-12. <https://doi.org/10.3390/su13020478>
- Gu, X., Qin, L., & Zhang, M. (2023). The impact of green finance on the transformation of energy consumption structure: Evidence based on China. *Frontiers in Earth Science* 10, 1097346. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1097346>
- Hacıhasanoğlu, Y.S. (2020). Review of the environmental Kuznets curve literature and the implications for green finance. *Interdisciplinary Public Finance, Business and Economics Studies* 3, 77-88. <https://doi.org/10.3726/b17540>
- He, L., Liu, R., Zhong, Z., Wang, D., & Xia, Y. (2019). Can green financial development promote renewable energy investment efficiency? A consideration of bank credit. *Renewable Energy* 143, 974-984. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.059>
- Huang, X., & Khan, Y.A. (2023). Transition to a low-CO2 emissions economy: China government policy for early-stage green finance. *Environmental Science and Pollution Research* 30(5), 11496-11503. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22905-0>
- Hwang, J. J. (2010). Promotional policy for renewable energy development in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(3), 1079-1087. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.029>



- Indico (2022). Call for Papers - 7th Green Finance Research Advances. Indico Cern. Retrieved February 8, 2023, from <https://indico.cern.ch/event/1175414/>
- International Green Finance Conference. (2022). International Green Finance Conference. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.ebrd.com/news/events/international-green-finance-conference.html>
- IPFA (2022). UK-Turkey Green Finance Conference. Www.Ipfa.org. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.ipfa.org/uk-turkey-green-finance-conference/>
- Jacobs, D., Marzolf, N., Paredes, J. R., Rickerson, W., Flynn, H., Becker-Birck, C., & Solano-Peralta, M. (2013). Analysis of renewable energy incentives in the Latin America and Caribbean region: The feed-in tariff case. *Energy Policy* 60, 601-610. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.024>
- Jia, Q. (2023). The impact of green finance on the level of decarbonization of the economies: An analysis of the United States', China's, and Russia's current agenda. *Business Strategy and the Environment* 32(1), 110-119. <https://doi.org/10.1002/bse.3120>
- Jiakui, C., Abbas, J., Najam, H., Liu, J., & Abbas, J. (2023). Green technological innovation, green finance, and financial development and their role in green total factor productivity: Empirical insights from China. *Journal of Cleaner Production* 382, 135131. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135131>
- Johansen, D.F., & Vestvik, R.A. (2020). The cost of saving our ocean - estimating the funding gap of sustainable development goal 14. *Marine Policy* 112, 103783. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103783>
- Khan, B., & Farooqui, N. (2021). Green Finance: A Shift Towards Sustainable Economic Growth. Available at SSRN 3992650. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3992650>
- Lee, C.C., & Lee, C.C. (2022). How does green finance affect green total factor productivity? Evidence from China. *Energy Economics* 107, 105863. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105863>
- Lee, C.C., Wang, F., Lou, R., & Wang, K. (2023). How does green finance drive the decarbonization of the economy? Empirical evidence from China. *Renewable Energy* 204, 671-684. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.058>
- Lee, J.W. (2020). Green finance and sustainable development goals: The case of China. *Journal of Asian Finance, Economics and Business* 7(7), 577-586. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2020.vol7.no7.577>
- Li, C., & Umair, M. (2023). Does green finance development goals affects renewable energy in China. *Renewable Energy* 203, 898-905. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.066>
- Li, J., Zhang, B., Dai, X., Qi, M., & Liu, B. (2023). Knowledge Ecology and Policy Governance of Green Finance in China-Evidence from 2469 Studies. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(1), 202. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010202>
- Li, W., Fan, J., & Zhao, J. (2022). Has green finance facilitated China's low-carbon economic transition?. *Environmental Science and Pollution Research* 29, 57502-57515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19891-8>
- Li, X., Chen, L., & Lin, J.H. (2023). Borrowing-firm environmental impact on insurer green finance assessment: Green loan subsidy, regulatory cap, and green technology. *Environmental Impact Assessment Review* 99, 107007. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107007>
- Liu, J., & Faure, M. (2018). Risk-sharing agreements to cover environmental damage: theory and practice. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics* 18(2), 255-273. <https://doi.org/10.1007/s10784-018-9386-0>
- Liu, S., & Wang, Y. (2023). Green innovation effect of pilot zones for green finance reform: Evidence of quasi natural experiment. *Technological Forecasting and Social Change* 186, 122079. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122079>
- Loock, M. (2012). Going beyond best technology and lowest price: on renewable energy investors' preference for service-driven business models. *Energy Policy* 40, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.059>
- Lu, S., Lu, W., Xu, M., Taghizadeh-Hesary, F., & Tang, Y. (2023). Water-energy-food security under green finance constraints in Southwest China. *Energy Economics* 118, 106478. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106478>
- Luo, Z. (Ed.). (2011). Green finance and sustainability: Environmentally-aware business models and technologies. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-60960-531-5>



- Ma, W. (2023). Exploring the role of educational human capital and green finance in total-factor energy efficiency in the context of sustainable development. *Sustainability (Switzerland)* 15(1), 429. <https://doi.org/10.3390/su15010429>
- Madi, M., & Kennet, M. (2021). (Eds.). *Green investment, green economy and green finance*. The Green Economics Institute. <https://geibooks.org.uk/product/green-investment-green-economy-and-green-finance/>
- Maria, M.R., Ballini, R., & Souza, R.F. (2023). Evolution of green finance: A bibliometric analysis through complex networks and machine learning. *Sustainability (Switzerland)* 15(2), 967. <https://doi.org/10.3390/su15020967>
- Matzdorf, B., & Meyer, C. (2014). The relevance of the ecosystem services framework for developed countries' environmental policies: A comparative case study of the US and EU. *Land Use Policy* 38, 509-521. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.12.011>
- Migliorelli, M., & Dessertine, P. (Eds.). (2019). *The rise of green finance in Europe: Opportunities and challenges for issuers, investors and marketplaces*. Palgrave Macmillan Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22510-0>
- Nawaz, M.A., Seshadri, U., Kumar, P., Aqdas, R., Patwary, A.K., & Riaz, M. (2021). Nexus between green finance and climate change mitigation in N-11 and BRICS countries: empirical estimation through difference in differences (DID) approach. *Environmental Science and Pollution Research* 28(6), 6504-6519. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10920-y>
- OECD (2022). *OECD Forum on Green Finance and Investment*. OECD Events. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.oecd-events.org/oecd-forum-on-green-finance-and-investment/>
- Ozili, P.K. (2022). Green finance research around the world: a review of literature. *International Journal of Green Economics* 16(1), 56-75. <https://doi.org/10.1504/IJGE.2022.10048432>
- Qin, M., Zhang, X., Li, Y., & Badarcea, R.M. (2023). Blockchain market and green finance: The enablers of carbon neutrality in China. *Energy Economics* 118, 106501. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106501>
- Risi, D. (2020). Time and business sustainability: Socially responsible investing in Swiss banks and insurance companies. *Business & Society* 59(7), 1410-1440. <https://doi.org/10.1177/0007650318777721>
- Sachs, J.D., Woo, W.T., Yoshino, N., & Taghizadeh-Hesary, F. (Eds.). (2019). *Handbook of green finance: Energy security and sustainable development*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0227-5>
- Sadiq, M., Nonthapot, S., Mohamad, S., Chee Keong, O., Ehsanullah, S., & Iqbal, N. (2022). Does green finance matter for sustainable entrepreneurship and environmental corporate social responsibility during COVID-19?. *China Finance Review International* 12(2), 317-333. <https://doi.org/10.1108/CFRI-02-2021-0038>
- Scott, D., & Gössling, S. (2021). Destination net-zero: what does the international energy agency roadmap mean for tourism?. *Journal of Sustainable Tourism* 30(1), 14-31. <https://doi.org/10.1080/09669582.2021.1962890>
- Stojanovic, D., & Ilic, B. (2018). Green financing in the function of risk management environment and sustainable economic growth. 30th International Scientific Conference on Economic and Social Development – Belgrade, 25-26 May 2018. [https://www.researchgate.net/publication/325781000\\_GREEN\\_FINANCING\\_IN\\_THE\\_FUNCTION\\_OF\\_RISK\\_MANAGEMENT\\_ENVIRONMENT\\_AND\\_SUSTAINABLE\\_ECONOMIC\\_GROWTH](https://www.researchgate.net/publication/325781000_GREEN_FINANCING_IN_THE_FUNCTION_OF_RISK_MANAGEMENT_ENVIRONMENT_AND_SUSTAINABLE_ECONOMIC_GROWTH)
- Taghizadeh-Hesary, F., & Yoshino, N. (2019). The way to induce private participation in green finance and investment. *Finance Research Letters* 31, 98-103. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.04.016>
- Taghizadeh-Hesary, F., & Yoshino, N. (2020). Sustainable solutions for green financing and investment in renewable energy projects. *Energies* 13(4), 788. <https://doi.org/10.3390/en13040788>
- Tang, X., & Zhou, X. (2023). Impact of green finance on renewable energy development: A spatiotemporal consistency perspective. *Renewable Energy* 204, 320-337. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.012>
- Tiawon, H., & Miar, M. (2023). The role of renewable energy production, energy efficiency and green finance in achieving sustainable economic development: evidence from Indonesia. *International Journal of Energy Economics and Policy* 13(1), 250-260. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13915>
- The Global Green Finance Leadership Program (GFLP) 2022: Scaling-up Sustainable Finance in Southeast Asia. (2022). World Bank. Retrieved February 8, 2023, from <https://www.worldbank.org/en/events/2022/11/28/the-global-green-finance-leadership-program-gflp-2022>

- Thompson, S. (2021). Green and sustainable finance: Principles and practice in banking, investment and insurance. Kogan Page. <https://www.koganpage.com/accounting-finance-banking/green-and-sustainable-finance-9781398609242>
- Tsai, S.B., Shen, C.H., & Song, H. (Eds.). (2019). Green finance for sustainable global growth. IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7808-6>
- United Nations Environment Programme (UN Environment), (2017). Design of a Sustainable Financial System - Green Finance Opportunities in ASEAN. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/22284>
- Wang, L., Huang, X., Yu, Y., Zhao, L., Wang, C., Feng, Z., Cui, D., & Long, Z. (2017). Towards cleaner production of rare earth elements from bastnaesite in China. *Journal of Cleaner Production* 165, 231-242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.107>
- Wang, M.L. (2023). Effects of the green finance policy on the green innovation efficiency of the manufacturing industry: A difference-in-difference model. *Technological Forecasting and Social Change* 189, 122333. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122333>
- Wang, Y., & Zhi, Q. (2016). The role of green finance in environmental protection: Two aspects of market mechanism and policies. *Energy Procedia* 104, 311-316. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.053>
- Wang, Z., Yao-Ping Peng, M., Anser, M.K., & Chen, Z. (2023). Research on the impact of green finance and renewable energy on energy efficiency: The case study E-7 economies. *Renewable Energy* 205, 166-173. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.077>
- Weber, O., & Oni, O. (2015). The impact of financial sector sustainability regulations on banks. *Canadian Electronic Library*. Retrieved February 10, 2023, from <https://policycommons.net/artifacts/1192221/the-impact-of-financial-sector-sustainability-regulations-on-banks/1745346/>
- Weforum (2019). These countries are leading the way in green finance. World Economic Forum. Retrieved February 16, 2023, from <https://www.weforum.org/agenda/2019/09/these-countries-are-leading-the-way-in-green-finance/>
- Wendt, K. (Ed.). (2021). *Green and social economy finance: A Review* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429329326>
- Wu, H. (2022). Trade openness, green finance and natural resources: A literature review. *Resources Policy* 78, 102801. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102801>
- Wu, H. (2023). Evaluating the role of renewable energy investment resources and green finance on the economic performance: Evidence from OECD economies. *Resources Policy* 80, 103149. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103149>
- Xia, Q. (2023). Does green technology advancement and renewable electricity standard impact on carbon emissions in China: role of green finance. *Environmental Science and Pollution Research* 30(3), 6492-6505. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22517-8>
- Xiang, S., & Cao, Y. (2023). Green finance and natural resources commodities prices: Evidence from COVID-19 period. *Resources Policy* 80, 103200. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103200>
- Xu, S., & Dong, H. (2023). Green finance, industrial structure upgrading, and high-quality economic development–intermediation model based on the regulatory role of environmental regulation. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(2), 1420. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021420>
- Yu, C.H., Wu, X., Zhang, D., Chen, S., & Zhao, J. (2021). Demand for green finance: Resolving financing constraints on green innovation in China. *Energy Policy* 153, 112255. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112255>
- Zhang, D., Chen, X.H., Lau, C.K.M., & Cai, Y. (2023). The causal relationship between green finance and geopolitical risk: Implications for environmental management. *Journal of Environmental Management* 327, 116949. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116949>
- Zhang, D., Mohsin, M., Rasheed, A.K., Chang, Y., & Taghizadeh-Hesary, F. (2021). Public spending and green economic growth in BRI region: Mediating role of green finance. *Energy Policy* 153, 112256. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112256>
- Zhang, D., Zhang, Z., & Managi, S. (2019). A bibliometric analysis on green finance: Current status, development, and future directions. *Finance Research Letters* 29, 425-430. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2019.02.003>

Zhang, H., Wang, Y., Li, R., Si, H., & Liu, W. (2023). Can green finance promote urban green development? Evidence from green finance reform and innovation pilot zone in China. *Environmental Science and Pollution Research* 30(5), 12041-12058. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22886-0>

Zhang, H., Xiong, P., Yang, S., & Yu, J. (2023). Renewable energy utilization, green finance and agricultural land expansion in China. *Resources Policy* 80, 103163. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103163>

Zhou, X., Tang, X., & Zhang, R. (2020). Impact of green finance on economic development and environmental quality: a study based on provincial panel data from China. *Environmental Science and Pollution Research* 27(16), 19915-19932. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08383-2>



# Journal of Turkish Operations Management

## Havaya setlerin seçimi için karşılaştırmalı çok kriterli karar verme yaklaşımı

Emre Yazıcı<sup>1</sup>, Ufukcan Ebiri<sup>2</sup>, Berat Alperen Kızılay<sup>3</sup>, Onur Oruç<sup>4</sup>, Hacı Mehmet Alakaş<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, Turkey, emreyazici92@hotmail.com ORCID ID: 0000-0002-3661-2119

<sup>2</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, Turkey, ufukcanebiri.06@gmail.com ORCID ID: 0000-0001-8667-4898

<sup>3</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, Turkey, alp alp98@gmail.com ORCID ID: 0000-0001-7591-5457

<sup>4</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, Turkey, onuroruc329@gmail.com ORCID ID: 0000-0002-1184-9574

<sup>5</sup>Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yahşihan/Kırıkkale, Turkey, hmalagas@kku.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-9874-7588

\*Sorumlu Yazar

**Makale Bilgisi**

**Özet**

### Makale Geçmişi:

Geliş: 06.03.2023

Revize: 02.12.2023

Kabul: 08.12.2023

Günümüzde teknolojik ürünlerin kullanımı hayatımızın hemen hemen her alanında vardır. Bu ürünlerin üretiminde çeşitli amaçlar için kullanılan mekanik ve elektronik cihazlar bulunmaktadır. Bu cihazlardan birisi de elektronik devre elemanlarının lehimlenmesinde kullanılan havya setleridir. İşletmeler için ciddi mali yükleri olan ve hassas kullanım isteyen havya setlerinin seçimi önemli bir karar problemi niteliğindedir. Bu çalışmada bir elektronik işletmesi için alınması planlanan havya setlerinin seçimi problemi ele alınmıştır. Havya setlerinin seçiminde etkili olan kriterler belirlenerek kriterlerin ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ile hesaplanmıştır. Alternatiflerin sıralanması için karşılaştırmalı bir yaklaşım benimsenerek üç farklı sıralama metodu ile alternatiflerin sıralaması elde edilmiştir. Sıralamaların belirlenmesi için TOPSIS, COPRAS ve PROMETHEE yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre kriter ağırlığı en yüksek kriter ısı aralığı çıkmıştır. Alternatifler arasında ise Weller wx2020 TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerinde birinci alternatif olmuştur. COPRAS yöntemine göre ise birinci alternatif Weller wt1010 alternatifi olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Havya seti, AHP-TOPSIS, AHP-COPRAS, AHP-PROMETHEE

## Comparative multi criteria decision making approach soldering iron set selection

**Article Info**

**Abstract**

Today, the use of technological products is present in almost every aspect of our lives. Mechanical and electronic devices are used for various purposes in producing these products. One of these devices is soldering iron sets used for soldering electronic circuit elements. The selection of soldering iron sets, which have severe financial burdens and require precise use, is a crucial decision problem for businesses. This study examines the selection of soldering iron sets planned to be purchased for an electronics company. The criteria effective in selecting soldering iron sets were determined, and the criteria weights were calculated with the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. A comparative approach was adopted to rank the alternatives, and the ranking of the alternatives was obtained with three different ranking algorithms. TOPSIS, COPRAS, and PROMETHEE methods were used to determine the rankings. According to the study results, the criterion with the highest criterion weight is the temperature range criterion. Among the alternatives, Weller wx2020 was the first alternative in TOPSIS and PROMETHEE methods. According to the COPRAS method, the first alternative was the Weller wt1010 alternative.

### Article History:

Received: 06.03.2023

Revised: 02.12.2023

Accepted: 08.12.2023

**Keywords:** Soldering iron set, AHP-TOPSIS, AHP-COPRAS, AHP-PROMETHEE

## 1. Giriş

Günümüzün teknoloji dünyasında elektronik cihazlar hayatımızın her alanında yerini almaktadır. Gerek günlük hayatımız gerek iş hayatımız içerisinde bilgisayar, telefon ve televizyon gibi çeşitli elektronik cihazlar kullanılmaktadır. Bunlar dışında otomotiv, beyaz eşya gibi önemli üretim hacmine sahip ekonomik değeri yüksek ürünler için üretilen çeşitli elektronik parçalar ve cihazlar vardır. Bu cihazlarda bulunan elektrik devresinin çalışmasını sağlayan parçalara elektronik devre elemanları denilmektedir. Elektronik devre elemanlarının birbirlerine ve cihazlara montajını sağlayan araçlara ise havya adı verilmektedir.

Havya ile elektronik devre elemanlarının cihazlara montajında lehimleme görevi yerine getirilmektedir. Devre elemanlarını birbirine lehimleyebilmek için hızlı ve yüksek bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Havyalar hızlı bir şekilde ısınabilme, lehimleme yaparken ısı kaybı yaşanmama, gövde kısmının yalıtımlı olması gibi çeşitli özelliklere sahip olmaktadır. Başarılı bir lehimleme işlemi yapabilmek için gerekli ekipman ve teçhizatlar; havya, lehim (teli, pompası, tabancası, pastası) ve havya istasyonundan oluşmaktadır. Havyalar teknik özellikleri ve yapısal özelliklerine göre farklı biçimlerde sınıflandırılabilir. Yapısal olarak havyaların kalem, tabanca ve gazlı olmak üzere üç farklı çeşidi bulunmaktadır.

Elektronik devre elemanlarının lehimlenmesinde en çok kullanılan havya türü kalem havyalardır. Kalem havyalar istasyonlu ve istasyonsuz olmak üzere iki grupta incelenir. İstasyonlu havyalar yalnızca bağlı bulunduğu istasyonda çalışan havyalardır. Bu havyalar gerilim ayarlı veya ısı ayarlı olarak ikiye ayrılmaktadır. İstasyonsuz havyalar ise her yerde kullanılabilme özelliğine sahip olmakla birlikte tek bir ısı değerinde çalışmaktadırlar. Tabanca havyaların gücü yüksek olduğu için çok kalın iletkenlerin lehimlenmesinde kullanılmaktadır. Enerji kaynağının bulunmadığı ortamlarda gazlı havyalar kullanılır. Yakılan gaz sayesinde havya ucu ısıtılarak lehimleme işlemi yapılır. Teneke, çinko ve bakır gibi metal levhaların ısıtılmasında gazlı havyalar, savunma sanayisi gibi seri üretim yapan üretim sistemlerinde istasyonlu kalem havyalar, bakım onarım yapan küçük işletmeler ve öğrenme amaçlı elektronik kart üretilen öğrenme ortamlarında kalem havya, kalın ürünlerin işlem gerektirdiği durumlarda yüksek güçlü havyalar olan tabanca havyalar tercih edilmektedir.

Üretim sürecinde kaliteli ürün üretimi, ürünlerin kusursuz olarak işlenmesi ve üretimin kesintisiz bir şekilde devam etmesi için havya seçimi kritik öneme sahiptir. Doğru ve etkili bir seçim için verilerin analiz edilmesi ve birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Havyaların teknik ve yapısal özelliklerinin çeşitlenmesi, üretim ortamlarına ve işlem görececek hammaddeye göre aranan teknik özelliklerin değişmesi karar vericilerin çok sayıda kriteri dikkate almasına neden olmaktadır. Bununla birlikte finansal kısıtların var olması halinde problem karmaşık bir karar problemi haline dönüşmektedir. Bu nedenle üretim sürecinde kullanılacak havyanın seçimi üretici için önemli düzeyde bilgi ve zaman gerektiren bir karar problemi niteliğindedir. Bu tarz karar problemleri literatürde çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) problemi olarak bilinmektedir. Karar problemi üzerinde farklı düzeylerde etkiye sahip kriterlerin değerlendirilmesi ve alternatiflerin sıralanmasında ÇÖKV yöntemleri karar verici için etkili bir çözüm yöntemidir. ÇÖKV iyi performansla sahip ve en uygun alternatifin seçiminde alternatifler arasında kıyaslama yaparak uzlaşık bir çözüm sunmaktadır. Bu çalışmada ele alınan problem ÇÖKV problemi olarak değerlendirilmekte olup seri üretim yapan bir elektronik firmasında ihtiyaç duyulan havya seti için en uygun alternatifi belirleme problemi incelenmiştir.

Problemin çözümünde kriter ağırlıklarının hesaplanması için uygulama kolaylığı dikkate alınarak Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılmıştır. En uygun havya setinin seçimi için üç farklı yöntem ile alternatifler sıralanmıştır. Sıralama için TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), COPRAS (Complex Proportional Assessment) ve PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) yöntemleri kullanılmıştır. Üstünlüklere göre sıralama vermesi nedeniyle TOPSIS, kriterlerin türüne minimizasyon veya maksimizasyon yönlü oluşlarını dikkate alması nedeniyle COPRAS ve kriterleri nicel ve nitel durumlarına göre sınıflandırarak tercih fonksiyonu belirleme avantajı sunması nedeniyle PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır. Sıralama algoritmalarında ihtiyaç duyulan kriterlerin ağırlıkları AHP yöntemi ile hesaplanarak hibrit bir yaklaşım uygulanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatürde yer alan çalışmalar özetlendikten sonra üçüncü bölümde çözüm yöntemleri, dördüncü bölümde uygulama sonuçları ve son bölümde ise çalışmanın sonuç kısmı yer almaktadır.

## 2. Literatür araştırması

Çok ölçütlü karar verme yöntemi literatürde makine-teçhizat seçiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada özel bir işletmede kullanılan havya seti seçimi yapılmıştır. Literatürde makine teçhizat seçim problemi birçok çalışmada elen alınmış olsa da bu çalışma literatürdeki diğer çalışmalardan farklı bir makine teçhizata odaklanarak havya seti seçimi problemi ele alınmıştır. Çalışma makine teçhizat alanında yapılacak çalışmalara örnek bir uygulama özelliği taşımakta ve incelenen literatür ışığında havya seti seçimi için yapılan ilk örnek

özelliği taşımaktadır. Makine teçhizat seçimi, ürün seçimi ve kullanılan yöntemlerle ilgili literatür çalışmaları incelenerek bu bölümde özetlenmiştir.

Makine teçhizat ve ekipman seçimine yönelik olarak literatürde kullanılan yöntemler bu kısımda özetlenmiştir. Ertuğrul ve Özçil (2014) klima seçim problemi için TOPSIS ve VIKOR yöntemlerini kullanarak en uygun klimanın seçimini yapmışlardır. Deringöz ve diğ. (2021a) AHP, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemini kullanarak, COVID-19 takibinde giyilebilir sağlık teknolojilerinin ÇÖKV yöntemleri ile değerlendirmişlerdir. Kısa ve Perçin (2017) makine seçimi problemini bulanık DEMATEL ve bulanık VIKOR yöntemleri ile incelemişlerdir. Akça ve diğ. (2015) bireylerin takip edilmesine ihtiyaç duyulduğunda kullanılması gereken kişi için takip cihazının seçimi için beş farklı alternatif belirlemiştir. Belirlenen alternatifler arasından en uygun cihaz AHP yöntemi ile seçilmiştir. Kaya ve diğ. (2007) bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak imalat işletmesi için en uygun CNC makinesini belirlemişlerdir. Perçin (2012) CNC seçimine etki eden kriterleri belirlemiştir ve ardından bulanık AHP ile kriterleri ağırlıklandırmış ve bulanık TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralamasını elde etmiştir. Sonuçların güvenilirliği için ise bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Çalışmada dört CNC alternatifi değerlendirilmiş ve en uygun CNC seçilmiştir. Soba (2012) PROMETHEE yöntemi kullanılarak en uygun panelvan otomobil seçim probleminde çözüm önerisinde bulunmuştur.

Yeni nesil teknolojik araçların seçimi de güncel literatürde yerini almaktadır. Keçek ve Yüksel (2016) akıllı telefon seçiminin çözümünde AHP ve PROMETHEE yöntemini kullanmıştır. Turgut ve diğ. (2020) spor yapanlar için en uygun akıllı saatin AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile seçimini yapmışlardır. Deringöz ve diğ. (2021b) AHP, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri kullanılarak akıllı gözlük seçimi yapmışlardır. Amiri ve diğ. (2011) VIKOR yöntemi kullanılarak İranlı bir araba parçacısı için tedarikçi seçimi yapmışlardır. Pophali ve diğ. (2011) AHP ve GRA yöntemleri kullanılarak atık su arıtıcı seçimi yapmışlardır. Cristóbal (2012) TOPSIS yöntemi ile yüklenici seçimi yapmışlardır. Orçanlı ve Özen (2013) AHP ve TOPSIS yöntemleri ile E-Kitap okuyucu seçimi yapmıştır. Tayyar ve Arslan (2013) AHP ve VIKOR yöntemleri kullanılarak fason üretim için işletme seçimi yapmışlardır. Stevic ve diğ. (2017) COPRAS ve MULTIMOORA yöntemleri kullanılarak tedarikçi seçimi yapmışlardır. Bahraminasab ve Jahan (2011) VIKOR yöntemi kullanılarak total diz replasmanının femoral bileşeni için malzeme seçimi yapmışlardır. Singh ve diğ. (2013) TOPSIS yöntemi ile ağ trafiği için uygulama tekniklerinin seçimi yapmışlardır. Shafabakhsh ve diğ. (2014) TOPSIS yöntemi ile toplu taşıma sistemi seçimi yapmışlardır. Topoyan ve diğ. (2008) bulanık AHP yöntemi ile iklimlendirme sistemi seçimi yapmışlardır. Özdağoğlu ve diğ. (2019) klinik laboratuvarlarda kullanılan tam kan sayım cihazının seçimi için SWARA, WPM, TODIM ve AHP yöntemlerini kullanmışlardır.

İnanır ve Deste (2021) KBRN ekibi için koruyucu elbise seçiminde AHP ve VIKOR yöntemlerini kullanmışlardır. Uğur vd. (2018) çatı kaplama malzemesinin seçiminde VIKOR yöntemini kullanmışlardır. Wang ve Chang (2007) TOPSIS yöntemleri ile uçakların değerlendirilmesi yapılmıştır. Samvedi ve diğ. (2012) tedarikçi değerlendirme problemi için AHP ve TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Gavcar ve Kara (2020) otomotiv sektöründe elektrikli otomobil seçimi için ENTROPI ve TOPSIS yöntemleri ile bir uygulama yapmışlardır. Tzeng ve diğ. (2005) AHP, TOPSIS ve VIKOR toplu ulaşımda otobüsler için alternatif yakıtları değerlendirmişlerdir. Piantanakulchai ve Saengkhaio (2003) AHP yöntemi ile ulaşım alternatiflerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. Baležentis, Baležentis & Misiunas (2012) işletmelerin finansal oranlarını kriter olarak kabul eden bir model oluşturmuşlar ve PROMETHEE ve VIKOR yöntemleri ile alternatifleri sıralayıp sonuçları karşılaştırarak optimum alternatifi belirlemişlerdir. İncelenen çalışmaların özeti Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Literatür Özeti

Yazar (Yıl)	B-TOPSIS	B-AHP	TOPSIS	PROMETHEE	AHP	VIKOR	B-DEMATEL	B-VIKOR	SWARA	WPM	COPRAS	AHP	ENTROPI
Ertuğrul ve Özçil (2014)			✓			✓							
Deringöz vd. (2021a)			✓	✓	✓								
Kısa ve Perçin (2017)							✓	✓					
Akça vd. (2015)					✓								
Kaya vd. (Kaya et al., 2007)	✓												
Perçin (2012)		✓	✓										
Soba (2012)				✓									
Keçek ve Yüksel (2016)				✓	✓								
Turgut (2020)				✓	✓								
Deringöz vd. (2021b)			✓	✓	✓								
Amiri vd. (2011)						✓							
Pophali vd. (2011)					✓								
Cristóbal (2012)			✓										
Orçanlı ve Özen (2013)			✓		✓								

Tayyar ve Arslan (2013)			✓	✓				
Stevic vd. (2017)								✓
Bahraminasab ve Jahan (2011)								✓
Singh, Kumar & Singla (2013)				✓				
Shafabakhsh (2014)			✓					
Topoyan vd. (2008)	✓							
Keleş (2019)							✓	✓
İnanır ve Deste (2021)				✓	✓			
Uğur (2018)								✓
Wang ve Chang (2007)			✓					
Samvedi vd. (2012)			✓		✓			
Gavcar ve Kara (2020)			✓					
Tzeng vd. (2005)			✓		✓	✓		
Piantanakulchai ve Saengkhao (2003)					✓			
Baležentis ve Misiunas (2012)				✓	✓			
Bu çalışma			✓	✓				✓

Kısaltmalar: B-TOPSIS: Bulanık TOPSIS, BAHP: Bulanık AHP, TPS: TOPSIS, B-DEMATEL: Bulanık DEMATEL, B-VİKOR: Bulanık VİKOR, COPRAS

### 3. Materyal ve Metot

Çalışmada ele alınan problem bir karar problemidir. Karar problemlerinin çözümünde literatürde en yaygın kullanılan yöntemlerden birisi ÇÖKV yöntemleridir. ÇÖKV yöntemleri karar verme sürecinde karar vericilerin rasyonel hareket tarzını belirlemede yardımcı olan analitik bir yaklaşım sunar. Fayda temelli ve üstünlük temelli olmak üzere çeşitli yaklaşımlar sunan bir yöntemler bütünüdür. ÇÖKV, karar sürecinde karar vericinin kararlarını etkileyen kriterleri dikkate alarak problemin modellemesine ve süreç sonunda faydayı maksimize etmeye/maliyeti minimize etmeye yönelik bir analiz sürecine dayanır. Bu çalışmada ÇÖKV yöntemlerinden AHP, COPRAS, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerinden faydalanılmıştır.

#### 3.1 Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

AHP yöntemi Saaty tarafından 1977 yılında karar verme problemlerinin çözümünde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. AHP yöntemi sezgileri, deneyimleri ve bilgileri karar sürecine dahil edebilen, karar almada nicel ve nitel ölçütleri değerlendirebilen, karmaşık problemlerde hiyerarşik bir yapı izleyerek problemlerin çözülmesini sağlayan bir yöntemdir. AHP yönteminde önem sırası en az üç seviyeden oluşması gerekir. Önem sıralamasının en üst seviyesinde amaç, orta seviyesinde ise ana ölçütler ve varsa eğer bu ölçütlerin altında alt ölçütlere yer verilir. Hiyerarşinin en alt basamağında ise karar alternatifleri bulunur.

Problemin çözümünün tutarlı olması için ikili karşılaştırmalarda kriterlerin sayısı doğru belirlenmeli ve her bir kriter doğru tanımlanmalıdır. AHP, grup karar alınmasında ve birçok ölçüt ile uygulanabilir olması sebebi ile yararlı bir yöntemdir. AHP yönteminde deneyimli ve uzman kişilere ihtiyaç vardır. Bunun sebebi ise önem sıralamaları ve ikili karşılaştırma matrislerinin öznel olmasından kaynaklanır.

AHP yönteminin adımları aşağıdaki biçimdedir (L. Wang et al., 2020).

**Adım 1:** İlk olarak kriterler ve alternatifler belirlenir. Bunlara ilişkin olarak hiyerarşik yapı oluşturulur.

**Adım 2:** İkili karşılaştırma matrisi (A) denklem 1'deki gibi oluşturulur. Bu adımda her bir kriterin göreceli önem düzeyi uzmanlar tarafından değerlendirilir. Karşılaştırma matrisinde değerlendirmeler için Saaty (Saaty, 1977)'nin 1 ile 9 skalası olarak bilinen Tablo 2'de yer alan önem derecesi ölçeği kullanılır.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} = 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} = 1/a_{1n} & a_{n2} = 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$a_{ij}$ , i. kriterin j. kriterine göre önem düzeyini gösterir.  $a_{ij}$  1'den büyükse i. kriter j. kriterine göre daha önemlidir. 1'den küçük olması durumunda ise tam tersi söz konusudur. 1'e eşit olması ise iki kriterin eşit düzeyde öneme sahip olduğunu gösterir.

Tablo 2. Saaty 1-9 önem derecesi ölçeği

Önemi	Tanım	Açıklama
1	Eşit düzeyde	Her iki kriterde eşit düzeyde öneme sahiptir.

	önemli		
3	Biraz önemli		Bir kriter diğerine göre biraz daha önemlidir.
5	Fazla önemli		Bir kriter diğerine göre çok daha önemlidir.
7	Çok önemli	fazla	Kriter diğer kriterlere göre kesinlikle çok daha önemlidir.
9	Son önemli	derece	Kriter diğerine göre son derece önemlidir.
2-4-6-8	Ara değerler		

**Adım 3:** İkili karşılaştırma matrisleri normalize edilir. Normalizasyon işlemi için denklem 2'den faydalanılır.

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

**Adım 4:** Kriterlerin önem düzeyleri hesaplanır. Her bir kriterin önem düzeyi denklem 3 ile hesaplanır.

$$w_i = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n a_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

**Adım 5:** Tutarlılık oranı hesaplanır. Hesaplama  $\lambda_{\max}$  değeri denklem 4'teki gibi hesaplanır. İkili karşılaştırma sonucu oluşturulan bir A matrisinin tutarlı olup olmadığını belirleyebilmek CI katsayısı denklem 5 ile hesaplanır.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \right) \quad (4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Tutarlılığı belirlemek için Tablo 3'te yer alan ve kullanılan kriter sayısına göre farklılık gösteren Rassallık İndeks (RI) değerinin bilinmesi gerekir.

Tablo 3. Rassallık göstergeleri

N	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32
N	8	9	10	11	12	13	14
RI	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53	1.56	1.57

Tutarlılık (CI) ve Rasallık (RI) değerleri belirlendikten sonra Tutarlılık Oranı (CR) hesaplanır.

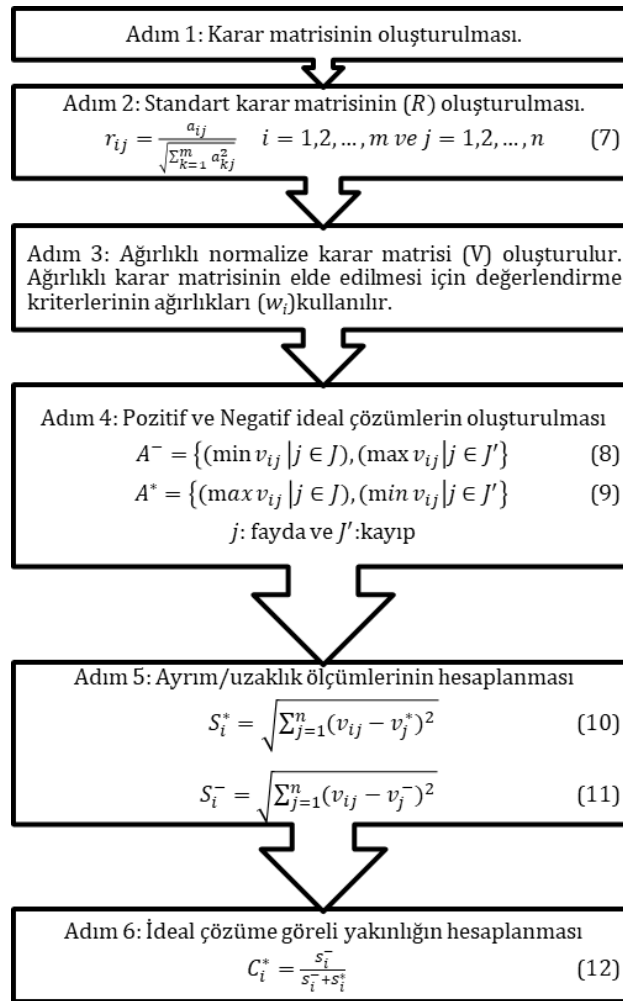
$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

CR değeri 0,1'den küçük eşit ise kabul edilebilir, aksi takdirde karşılaştırma matrislerinin tutarlılığı için yeniden karşılaştırma değerleri kontrol edilmelidir. Diğer bir ifade ile algoritmanın ikinci adımına tekrar dönülür.

### 3.2 TOPSIS yöntemi

TOPSIS yöntemi ÇÖKV yöntemlerinden biridir. TOPSIS yöntemi, değerlendirilen alternatiflere göre yapay olarak oluşturulan pozitif ideal alternatif ve negatif ideale en uzak olan alternatifin seçilmesi fikrine dayanmaktadır (Liu ve diğ., 1994). Pozitif ideal çözüme en yakın alternatif en iyi çözüm olarak kabul edilir. TOPSIS yönteminin aşamaları aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Alakaş ve diğ., 2021).





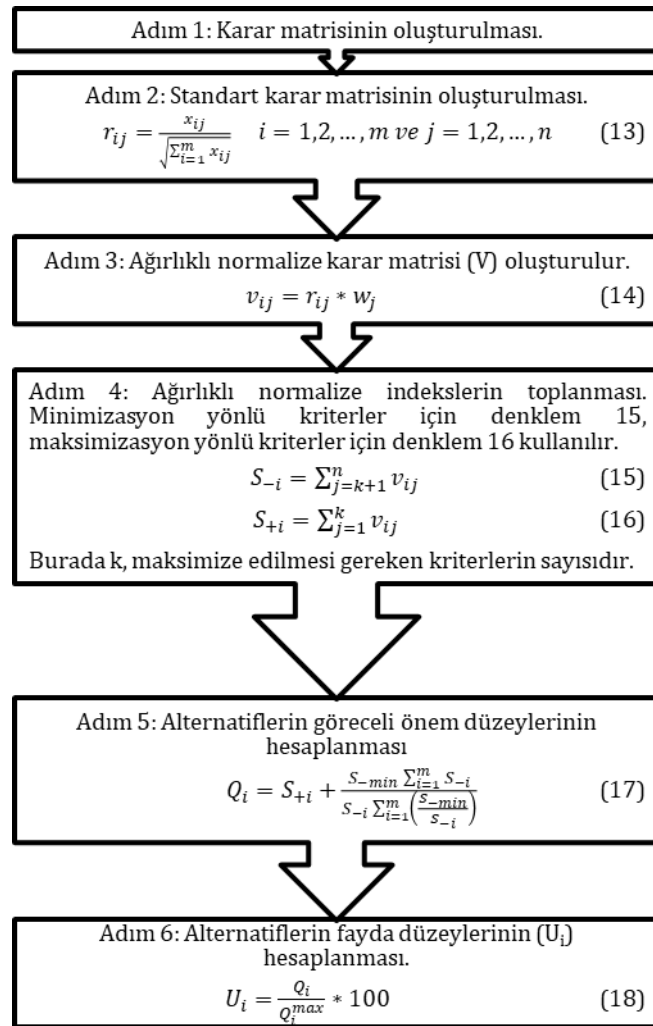
Şekil 1. TOPSIS yöntemi adımları

TOPSIS yönteminin ilk adımında karar matrisi ( $D$ ) denklem 13'teki gibi oluşturulur. Karar matrisi içerisinde alternatifler alt alta sıralanmakta ve her bir kriterin alternatiflere göre gösterdikleri özellikler listelenmektedir.

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

### 3.3 COPRAS yöntemi

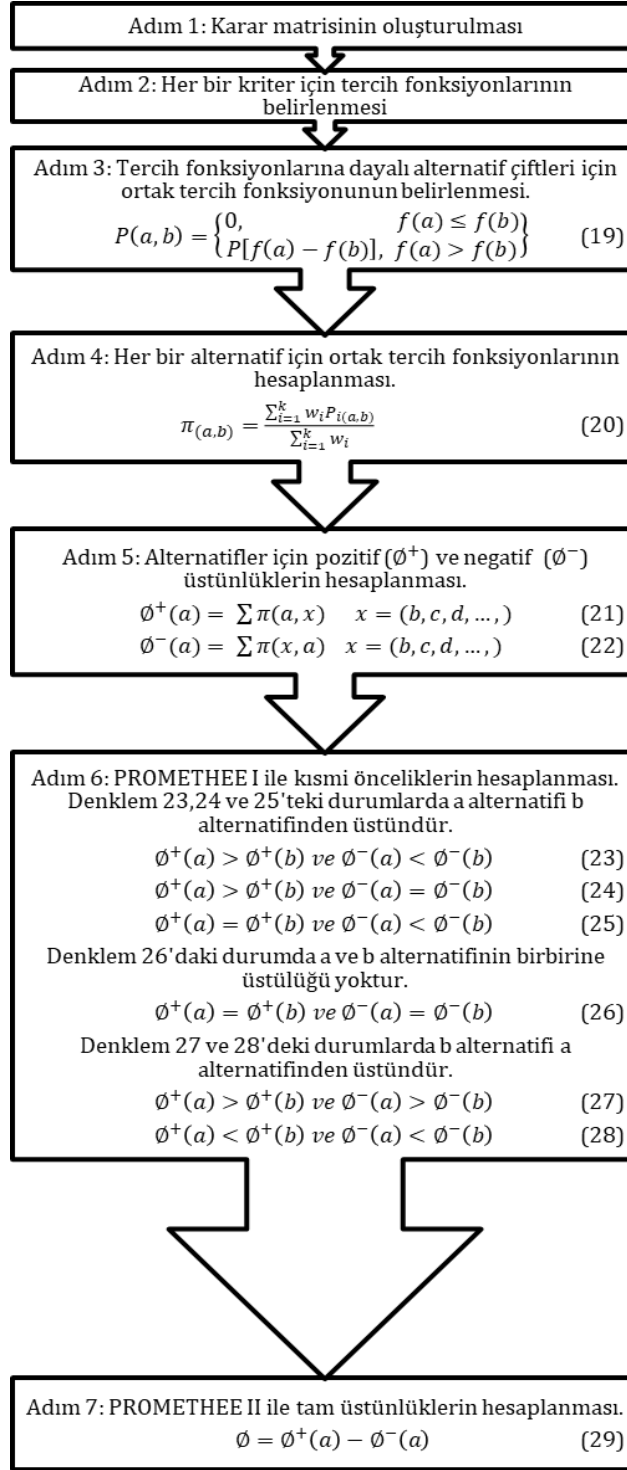
Zavadskas ve Kaklauskas (1994) tarafından önerilen COPRAS yöntemi nicel veya nitel kriterlerin değerlendirilmesinde karar verici için minimizasyon ve maksimizasyon özelliklerini dikkate alarak karar alternatiflerini sıralayan ve değerlendiren ÇÖKV yöntemidir. COPRAS yöntemini diğer ÇÖKV yöntemlerinden ayıran özellik, alternatiflerin önem düzeyi ve önceliğinin doğrudan ve oransal bağımlılığından hareket etmesidir. Diğer bir ifade ile karar alternatiflerini birbiriyle karşılaştırarak diğer alternatiflerden ne düzeyde iyi veya kötü olduğunu yüzdesel olarak ortaya koymasındır (Adar & Kiliç Delice, 2020). Yöntemin adımları Şekil 2'de sunulmaktadır (Zavadskas ve diğ., 1994).



Şekil 2. COPRAS yöntemi adımları

### 3.4 PROMETHEE yöntemi

PROMETHEE yöntemi Brans (1982) tarafından geliştirilen üstünlük temelli bir yaklaşımdır. PROMETHEE yönteminde alternatiflerin sıralanması için kriterlerin yapılarına göre tercih fonksiyonları belirlenir. Tercih fonksiyonları belirlenirken kriterlerin nicel ve nitel olması gibi özellikleri dikkate alınarak altı farklı tercih fonksiyonundan uygun olanı seçilir. Bu tercih fonksiyonları olağan tip (birinci tip), U tipi (ikinci tip) V tipi (üçüncü tip), seviyeli (dördüncü tip), lineer (beşinci tip) ve Gaussian tipi (altıncı tip) fonksiyonlarıdır (Brans & Vincke, 1985). Karar matrisinin oluşturulması ile başlayan yöntemin adımları Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3. PROMETHEE yöntemi adımları

#### 4. Havya Seti Seçimi

Bu çalışmada Ankara'da bir elektronik firması olarak hizmet veren ve yükselteç cihazları üreten bir işletmenin havya seti seçim sürecine yönelik karar problemi ele alınmıştır. Yükselteç cihazları üretiminde havya setleri kullanılmaktadır. Havya setlerinin işletmeye maliyetinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bunun üzerine bu mali yükü azaltmak ve uygun havya setini seçmek için ÇÖKV yöntemlerinden olan AHP yöntemi ile kriterlerin ağırlıkları hesaplanmıştır. Ardından alternatifler COPRAS, TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri ile sıralanmıştır ve en uygun set belirlenmiştir. Bu süreçte AHP yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları sıralama yöntemlerinde kullanılmıştır.

#### 4.1 Problemin tanımlanması

Çalışmada bir elektronik firmasının SMD dizgi, test ölçümü, montaj, ARGE, modül EMM, cihaz EMM departmanlarında kullanılmak ve yedek olarak depoda bulundurmak üzere 30 adet havya setinin alımı için alternatif cihazların seçimine ilişkin karar problemi incelenmektedir. Elektronik firmasında neredeyse bütün departmanlar havya setlerine ihtiyaç duymaktadır. Havya setinin bozulması ve arızalanması durumunda üretimin devamı için yedek havya setinin kullanımına geçilip bu süreçte bozulan havyaların da tamir edilmesi ve yedekte bekletilmesi gerekmektedir. Üretim sürecinde kullanımı ve arıza durumları takip edilerek ilgili firmada yılda en az 30 havya setinin bulundurulması gerektiği belirlenmiştir. Bu gereksinimin karşılanması için alternatif cihazlar arasında en uygun cihazın seçimi gerekmektedir. Bu amaçla problemin çözümü için dikkate alınan kriterler ve alternatifler belirlenerek sonraki bölümde açıklanmıştır.

#### 4.2 Kriterlerin belirlenmesi

Kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi için şirkette havya setleri ve satın alma süreçleri hakkında bilgi sahibi olan üretim mühendisi, satın alma müdürü ve operatörden oluşan alanında uzman kişilerden görüşler alınmıştır. Cihazı kullanan kişilerin cihazda olmasını istediği kriterleri belirlemek amacıyla uzmanlar arasına operatörler de dahil edilmiştir. Üretim sürecinde elektronik devre elamanlarının lehimlenmesini etkileyen kriterler bu şekilde belirlenmiştir. Uzman görüşleri neticesinde belirlenen kriterler ve açıklamaları Tablo 4'te yer almaktadır.

**Tablo 4.** Havya seçimini etkileyen kriterler

Kriter	Açıklamalar	Türü	Yapı
<b>Isı aralığı</b>	Yapılan işlemlerde transistor gibi elektronik malzemelerin takılması ve sökülmesinde havya ısısının en az 380 C° olması gerektiği gözlenmiştir.	Max	Nicel
<b>Prob Uç</b>	Lehimleme işlemlerinde çift ve tek prob uçlu havyalar kullanılır. Söküm işlemlerinde aynı anda birden başka işlem gerçekleştirdiği için çift prob havyalara ihtiyaç vardır.	Max	Nitel
<b>Havya ısınma süresi</b>	Havyanın ısınma süresinin seri üretim yapan firmalar için 7-8 saniye olmasının ideal olduğunu ve acil işlemlerde ısınma süresi çok önemli olduğu gözlemlenmiştir.	Min	Nicel
<b>Birim maliyet</b>	Maliyet tüm firmalar için önemli bir etkidir, ekonomik olarak en uygun ve istenilen kriterleri sağlayan havya seti elde edilmek istenir.	Min	Nicel
<b>Sigorta</b>	Havyalarda sigorta olması havyanın el ile kullanıldığı için havyadan, işlenen cihaza ya da cihazdan havyaya akımın gitmesini önlemek için önemlidir bir kriterdir.	Max	Nitel
<b>Havyanın gücü</b>	Havyanın gücü kullanım yerine göre değişmekte. Genellikle kalın iletkenlerin olmadığı yerde 30-120W havyalar tercih edilir.	Max	Nicel

#### 4.3 Alternatiflerin belirlenmesi

Alternatifler firmanın uzmanları ve satın alma müdürü önerileri dikkate alınarak piyasa araştırması neticesinde belirlenmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında piyasa araştırması yapılarak firmanın istediği asgari özelliklere sahip altı farklı alternatif belirlenmiştir. Bu alternatifler ve alternatiflere ilişkin açıklamalar Tablo 5'te özetlenmektedir.

**Tablo 5.** Alternatif havya setleri

Weller wx 2020	WX serisinde yer alan bu cihaz iki kanallı bir yapıya sahiptir. İki kanal dijital lehimleme istasyonu 2x120 W'dır. Özellikle yüksek ısı gücüne ihtiyaç duyan işlemler için tercih edilebilirliği yüksektir. Fakat yüksek gücünden kaynaklı olarak çok ince uç seçenekleri kullanılamamaktadır. 2xWXP 120 Set (2*120W El Aparatı ve Sehpaları)
Weller wt1012	WT serisinde yer alan bu cihaz tek kanallıdır. Dijital lehimleme istasyonu 80Watt'tır.El aparatı ile uç seçenekleri bu ünite ile birebir uyumludur. WSP 80 Set (80W El Aparatı ve Sehpası)
Weller wx1010	WX serisinde 120 W. Dijital lehimleme istasyonuna sahip tek kanallı bir cihazdır. Özellikle yüksek ısı gücüne ihtiyaç duyan işlemler için tercih edilebilirliği yüksektir. Fakat yüksek gücünden kaynaklı olarak çok ince uç seçenekleri kullanılamamaktadır. WXP 120 Set (120W

El Aparatı ve Sehpa)	
Weller wx1011	WX serisinde dijital lehimleme istasyonu ile mikro lehimleme işlem yeteneğine sahiptir. Isınma hızı açısından yüksek teknolojisi ile mikro lehimleme uygulamaları için iyi bir alternatiftir. Tek kanallı bir cihazdır. WXMP Set (40W – 55W El Aparatı ve Sehpa)
Weller wt1010	WT serisinde 90W dijital lehimleme istasyonuna sahip tek kanallı bir cihazdır. Tek el aparatı ile yeni nesil bir cihazdır. 90 W'lık el aparatına sahiptir. XNT tip serisi lehimleme uçları WTP 90 lehimleme el aparatında kullanılmaktadır.
XYTRONICSLF853 D	LF serisinde iki kanallı 2x30Watt dijital lehimleme istasyonuna sahiptir. Çift el aparatı sayesinde farklı uygulamalara cevap verebilecek 30*2 W'lık el aparatına sahiptir.

#### 4.4 Kriter ağırlıklarının hesaplanması

Saaty (1977) tarafından geliştirilen “1-9 ölçeği” kullanılarak kriterlerin karşılaştırılması uzmanlar tarafından yapılmıştır. Üç uzmanın ortak görüşü neticesinde bir karşılaştırma elde edilmiştir. Uzmanların değerlendirmeleri neticesinde oluşturulan karşılaştırma matrisi Tablo 6’da yer almaktadır.

Tablo 6. Karşılaştırma matrisi

Karşılaştırma Matrisi	Isı aralığı	Havyanın gücü	Prob ucu	Sigorta	Birim maliyet	Havya ısınma süresi
Isı aralığı	1	9	6	7	4	8
Havyanın gücü	0,11	1	0,33	3,00	0,25	0,33
Prob uç	0,17	3,03	1	3,00	0,33	0,33
Sigorta	0,14	0,33	0,33	1	0,20	0,33
Birim maliyet	0,25	4,00	3,03	5,00	1,	3
Havya ısınma süresi	0,13	3,03	3,03	3,03	0,33	1
<b>TOPLAM</b>	<b>1,80</b>	<b>20,39</b>	<b>13,72</b>	<b>22,03</b>	<b>6,11</b>	<b>12,99</b>

Karşılaştırma matrisinin oluşturulmasının ardından Bölüm 3.1’de özetlenen AHP yöntemi adımları sırasıyla uygulanır. İlk olarak karşılaştırma matrisi denklem 2 kullanılarak normalize edilir. Ardından ise denklem 3 ile kriter ağırlıkları hesaplanır. Uygulanması sonucu elde edilen kriter ağırlıkları ve tutarlılık değerleri Tablo 7’de verilmektedir. Karar vericilerin değerlendirmelerinin tutarlı olması için tutarlılık oranının (CR) değeri 0.1’den küçük olması gerekmektedir. Tutarlılığın kontrolün için tutarlılık göstergesi (CI) ve tutarlılık oranı (RI) hesaplanmıştır. Tablo 7’de verilen sonuçlara göre tutarlılık oranının 0.09 değerine sahip olduğu ve karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu görülmektedir.

Tablo 7. AHP yöntemi kriter ağırlıkları ve tutarlılık oranı sonuçları

Kriterler	Isı aralığı	Havyanın gücü	Prob ucu	Sigorta	Birim maliyet	Havya ısınma süresi
<b>Kriter Ağırlıkları</b>	0,5039	0,0562	0,0883	0,0373	0,1963	0,1180
<b><math>\lambda = 6,56</math></b>	<b>CI = 0,11</b>			<b>CR = 0,09</b>		

AHP yöntemine göre kriter ağırlığı en yüksek kriter 0,5039 önem düzeyi ile ısı aralığı kriteridir. Önem düzeyi en yüksek ikinci kriter ise 0,1963 önem düzeyi ile birim maliyet kriteridir. Bu kriteri 0,1180 önem düzeyi ile havyanın ısınma süresi kriteri takip etmektedir. Diğer kriterler ise sırasıyla prob uç kriteri 0,0883 önem düzeyine, havya gücü kriteri 0,0562 önem düzeyine ve sigorta kriteri 0,0373 önem düzeyine sahiptir.

Elektronik devre elemanları çinko alüminyum gibi çeşitli özelliklere sahip malzemeler olabilir. Bu nedenle lehimlemedeki en önemli kriter havyanın ısı aralığı olması uzmanlar tarafından kabul gören bir sonuçtur. Zira işlem yapılacak ürüne göre ısı aralığı değişebilmekte ve havyadan beklenen temel özellikler yeterli seviyede ısı ile ürün üzerinde işlem yapmak yeteneğine sahip olmasıdır. Hesaplanan bu kriter ağırlıkları alternatiflerin sıralaması için kullanılacak yöntemlerde bir veri olarak kullanılacaktır.

#### 4.5 TOPSIS yöntemi ile alternatiflerin sıralanması

Belirlenen alternatiflerin sıralanması için veri matrisi oluşturulmuştur. Veri matrisini oluşturulmasında alternatiflerin satış ve pazarlamaya ilişkin katalog açıklamaları dikkate alınmıştır. Havya setlerinin verilerine göre oluşturulan karar matrisi ve AHP yöntemi ile elde edilen kriterlerin ağırlıkları Tablo 8’de mevcuttur.

**Tablo 8.** Veri matrisi ve ideal çözüm değerleri

Alternatifler/Kriterler	Isı aralığı	Havyanın gücü	Prob uç	Sigorta	Birim maliyet (TL)	Havyanın ısınma süresi
Kriter ağırlığı	0,5039	0,0562	0,0883	0,0373	0,1963	0,1180
Weller wx 2020	550	120	2	1	9790,8	4
Weller wt 1012	450	90	1	2	4352,69	6
Weller wx1010	550	120	1	1	6360,86	5
Weller wx1011	550	40	1	1	7001,95	5
Weller wt1010	550	90	1	1	4057,79	5
XYTRONICS LF853D	480	30	2	2	3427,9	10

TOPSIS yöntemi ile hesaplama neticesinde elde edilen ideal çözüm ve negatif ideal çözüm değerleri Tablo 9’ da sunulmaktadır. Bu değerler ile ayırım ölçütleri hesaplanan yakınlık dereceleri belirlenmiştir.

**Tablo 9.** TOPSIS yöntemi ideal çözüm ve negatif ideal çözüm değerleri

İdeal Çözüm Değerleri	21,62	3,10	5,10	2,15	12,60	7,83
Negatif İdeal Çözüm Değerleri	17,69	0,77	2,55	1,08	4,41	3,13

Ayırım ölçütlerinin ideal çözüme göre yakınlık sonuçları ise Tablo 10’da verilmiştir. Tablo 10’da  $C_i^*$  değerler dikkate alınarak sıralama elde edilmiştir ve havya seti seçiminde TOPSIS sıralaması verilmiştir. TOPSIS yöntemine göre Weller wx 2020 birinci alternatif olarak belirlenmiştir. Bu alternatifi sırasıyla Weller wx1011, Weller wx1010, XYTRONICS LF853D, Weller wt1010 ve Weller wt1012 takip etmiştir.

**Tablo 10.** TOPSIS yöntemine göre alternatifleri sıralaması

Alternatifler	$C_i^*$	Sıralama
Weller wx 2020	0,67	1
Weller wt 1012	0,23	6
Weller wx1010	0,48	3
Weller wx1011	0,49	2
Weller wt1010	0,33	5
XYTRONICS LF853D	0,38	4

#### 4.6 COPRAS yöntemi ile alternatiflerin sıralanması

COPRAS yönteminde ilk adım olarak karar matrisinin normalizasyon işlemi yapılır. Daha sonraki adımda ise kriterler ağırlık katsayısı ile çarpılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi elde edilmiştir. Sonraki adımda ise alternatifler için  $S_j^+$ ,  $S_j^-$ ,  $Q_i$  ve  $P_i$  değerleri hesaplanır. Son adım olarak ise  $P_i$  değerinin hesaplanmasında kullanılan eşitlik değeri hesaplanan her bir alternatif için yüzdelik değerler şeklinde elde edilir. Bu değerler Tablo 11’de gösterilmiştir. COPRAS yöntemine göre birinci alternatif Weller wt 1010 olmuştur.

Tablo 11. COPRAS yöntemine göre alternatiflerin sıralaması

Alternatifler	$Q_i$	$U_i$	Sıralama
Weller wx 2020	0,16799	92,4041	3
Weller wt 1012	0,16279	89,5454	4
Weller wx1010	0,16871	92,8012	2
Weller wx1011	0,15628	85,9642	6
Weller wt1010	0,1818	100	1
XYTRONICS LF853D	0,16242	89,3413	5

#### 4.7 PROMETHEE yöntemi ile alternatiflerin sıralanması

PROMETHEE yöntemi uygulanmadan önce kriterler için tercih fonksiyonları belirlenmelidir. Isı aralığı, havyanın gücü ve maliyet kriterleri nicel kriterler olduğundan ve değerleri doğrusal olarak artıp veya azaldığından 5.tip (lineer) tercih fonksiyonu kullanılmıştır. Prob uç ve sigorta kriterlerinde 0-1 veya “var-yok” şeklinde değerlendirme yapıldığından ve nitel bir kriter olduğu için 1.tip (olağan) tercih fonksiyonu

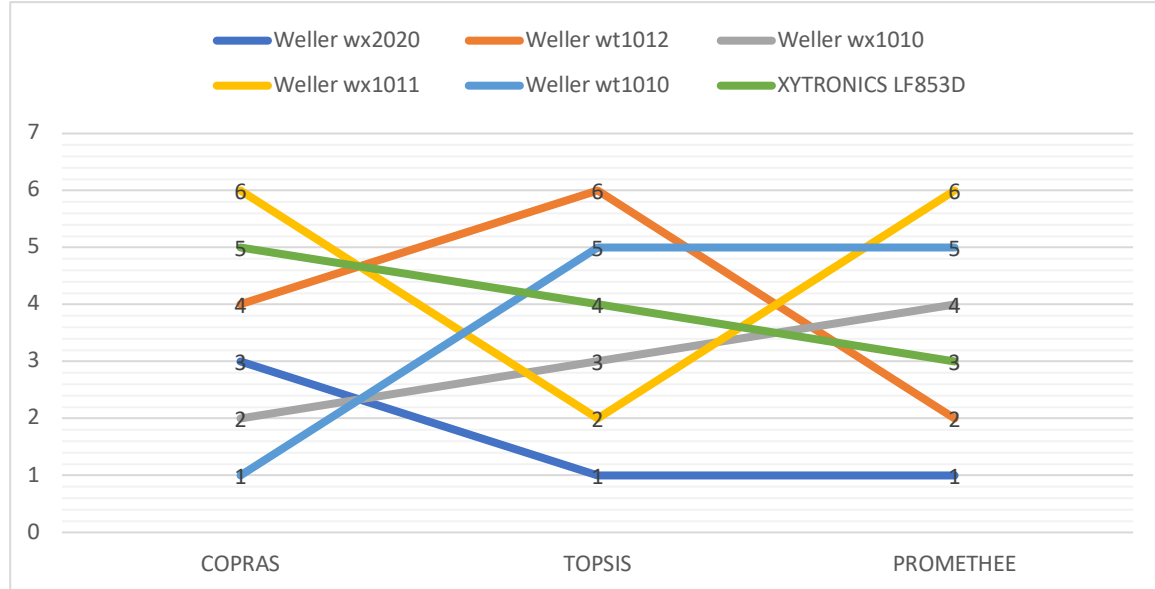
kullanılmıştır. Havya ısınma süresi ise nicel ancak bir kayıtsızlık değeri belirlenemediği için V tipi tercih fonksiyonu belirlenmiştir. PROMETHEE yöntemi, tam sıralama işlemini negatif ve pozitif üstünlük değerlerinin farklarını alarak elde ettiği net üstünlük değerine göre yapar. Pozitif üstünlüklerden negatif üstünlükler çıkartılarak PROMETHEE II ile tam sıralama elde edilir. Tablo 12’de görülen buna göre en yüksek Phi değerine sahip Weller wx 2020 ilk sırada yer almıştır. Sırasıyla Weller wt1012, XYTRONICS LF853D, Weller wx1010, Weller wt1010 ve Weller wx1011 takip etmektedir.

Tablo 12. PROMETHEE yöntemi sonuçları

Alternatifler	Phi	Phi+	Phi-	Sıralama
Weller wx 2020	0,1136	0,1286	0,0149	1
Weller wt 1012	-0,0114	0,0534	0,0648	2
Weller wx1010	-0,0218	0,0343	0,0561	4
Weller wx1011	-0,0363	0,0295	0,0658	6
Weller wt1010	-0,0266	0,0295	0,0561	5
XYTRONICS LF853D	-0,0175	0,1005	0,1180	3

Çalışmanın sonuçlarına göre öncelikle uzmanlar eşliğinde belirlenen kriterler dikkate alınarak AHP yöntemiyle kriter ağırlıklarının hesaplanmasının ardından elde edilen kriter ağırlıkları sıralama yöntemlerine entegre edilerek üç farklı sıralama elde edilmiştir. TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri ile elde edilen çözüm sonucuna göre Weller wx 2020 havya seti birinci alternatif olarak belirlenirken COPRAS yöntemi sonuçlarına göre Weller wt 1010 havya seti birinci alternatif olmuştur. Üç farklı yöntemle elde edilen sıralama Şekil 4’te özetlenmektedir.

Diğer alternatifler açısından bakıldığında ise altıncı alternatif COPRAS ve PROMETHEE yönteminde aynı, COPRAS ve TOPSIS yöntemini sıralamasında ortak bir alternatif bulunmamaktadır. Çözüm yöntemlerinde hassasiyeti ölçmek adına değişimler yapıldığında PROMETHEE yönteminde ısınma süresi kriterinin yavaş-orta-hızlı şeklinde nitel bir kriter olarak düşünülüp level tipi tercih fonksiyonu belirlenmesi halinde birinci alternatifin XYTRONICS LF853D adlı alternatif olduğu görülmüştür. Bu nedenle PROMETHEE yönteminin diğer yöntemlere göre değişimlere daha duyarlı olduğu söylenebilir. Zira diğer yöntemlerde çözüm algoritmasında değişimi sağlayacak ana unsur kriter ağırlıklarıdır. Kriter ağırlıkları değişmediği sürece alternatiflerin sıralaması aynı kalacaktır. Bu nedenle karar vericiye PROMETHEE yönteminin sonuçlarını dikkate alması önerilmektedir.



Şekil 4. Karşılaştırmalı sonuçlar

## 5. Duyarlılık Analizi

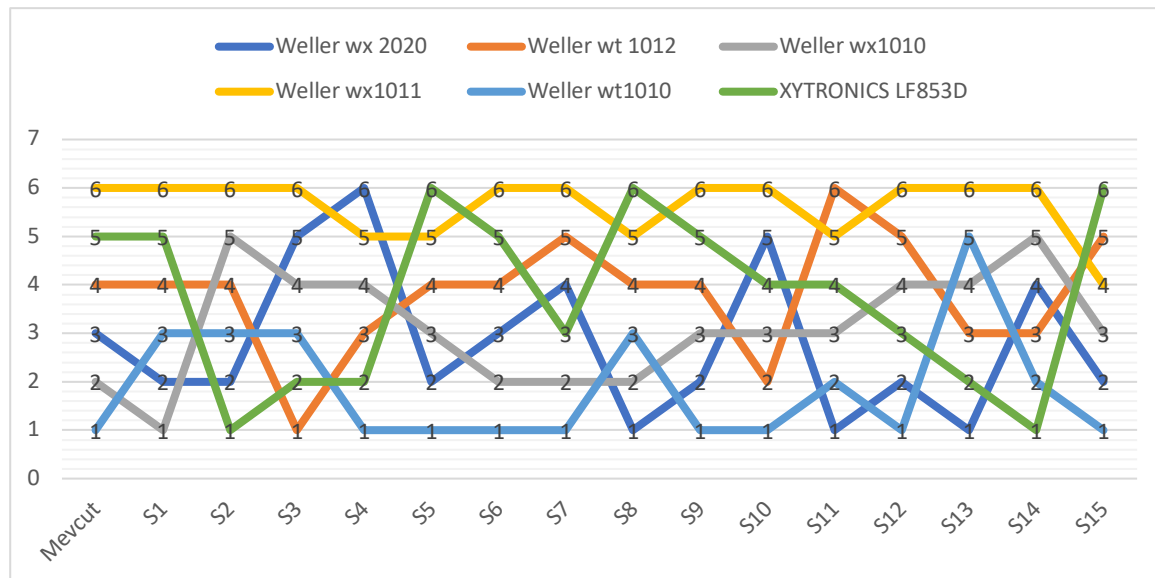
Duyarlılık analizi, her bir kriterin ağırlığı değiştiğinde alternatiflerin öncelik ve sıralamasındaki değişiklikleri gösterir (Falsafi et al., 2023; Kabassi & Martinis, 2021). Çok kriterli karar verme yöntemlerinde duyarlılık analizi literatürde farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlar arasında kriterlerin ağırlıklarının belirli bir düzeyde

artırılması veya azaltılması, bir kriterin ağırlığının sabit tutulması, diğerlerinin değiştirilmesi gibi çeşitli uygulamalar yer almaktadır (Yazıcı et al., 2022). Bu çalışma, duyarlılık analizinin kapsamlı bir kombinasyonu ile bir duyarlılık analizi gerçekleştirmiştir. Kombinasyon oluştururken elde ettiğimiz gerçek kriter ağırlıkları kullanıldı. Ayrıca bu kriterlerin ağırlıkları sırayla her bir kriterle değiştirilecek şekilde ikili bir kombinasyon oluşturulmuştur. Oluşturulan kombinasyonlar Tablo 13'te özetlenmiştir.

Tablo 13. Duyarlılık analizi senaryoları

Kriterler	Isı aralığı	Havyanın gücü	Prob uç	Sigorta	Birim maliyet (TL)	Havyanın ısınma süresi
Mevcut Kriter Ağırlıkları	0,5039	0,0562	0,0883	0,0373	0,1963	0,1180
Senaryo1	0,0562	0,5039	0,0883	0,0373	0,1963	0,1180
Senaryo2	0,0883	0,0562	0,5039	0,0373	0,1963	0,1180
Senaryo3	0,0373	0,0562	0,0883	0,5039	0,1963	0,1180
Senaryo4	0,1963	0,0562	0,0883	0,0373	0,5039	0,1180
Senaryo5	0,1180	0,0562	0,0883	0,0373	0,1963	0,5039
Senaryo6	0,5039	0,0883	0,0562	0,0373	0,1963	0,1180
Senaryo7	0,5039	0,0373	0,0883	0,0562	0,1963	0,1180
Senaryo8	0,5039	0,1963	0,0883	0,0373	0,0562	0,1180
Senaryo9	0,5039	0,1180	0,0883	0,0373	0,1963	0,0562
Senaryo10	0,5039	0,0562	0,0373	0,0883	0,1963	0,1180
Senaryo11	0,5039	0,0562	0,1963	0,0373	0,0883	0,1180
Senaryo12	0,5039	0,0562	0,1180	0,0373	0,1963	0,0883
Senaryo13	0,5039	0,0562	0,0883	0,1963	0,0373	0,1180
Senaryo14	0,5039	0,0562	0,0883	0,1180	0,1963	0,0373
Senaryo15	0,5039	0,0562	0,0883	0,0373	0,1180	0,1963

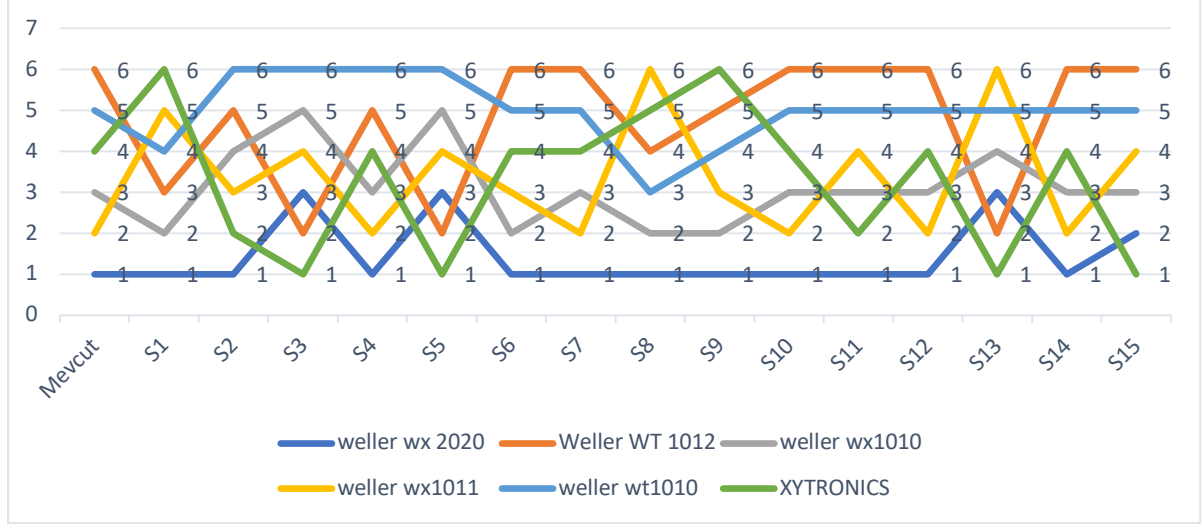
İkili kombinasyonlara göre üç farklı yöntemde duyarlılık analizleri yapılmıştır. COPRAS yöntemine göre yapılan duyarlılık analizi sonuçları Şekil 5'te özetlenmektedir. Duyarlılık analizi sonuçlarına göre kriter ağırlıklarında ciddi değişimlerin olduğu senaryolarda alternatiflerin sıralamalarında iki veya üç sıra değiştiğini görebilmekteyiz. Tüm değişimlere rağmen sonuncu alternatifin en iyi sıralaması dört olarak değişmektedir. Senaryoların önemli bir çoğunluğunda altıncı alternatif olarak sıralamasını korumuştur. Öte yandan birinci alternatif Senaryo 13'te en düşük sıralamayı elde etmiştir. Diğer durumlarda çoğunlukla birinci ve ikinci sıradaki yerini korumuştur.



Şekil 5. COPRAS Yöntemi Duyarlılık Analizi Senaryolarına Göre Alternatif Sıralamaları

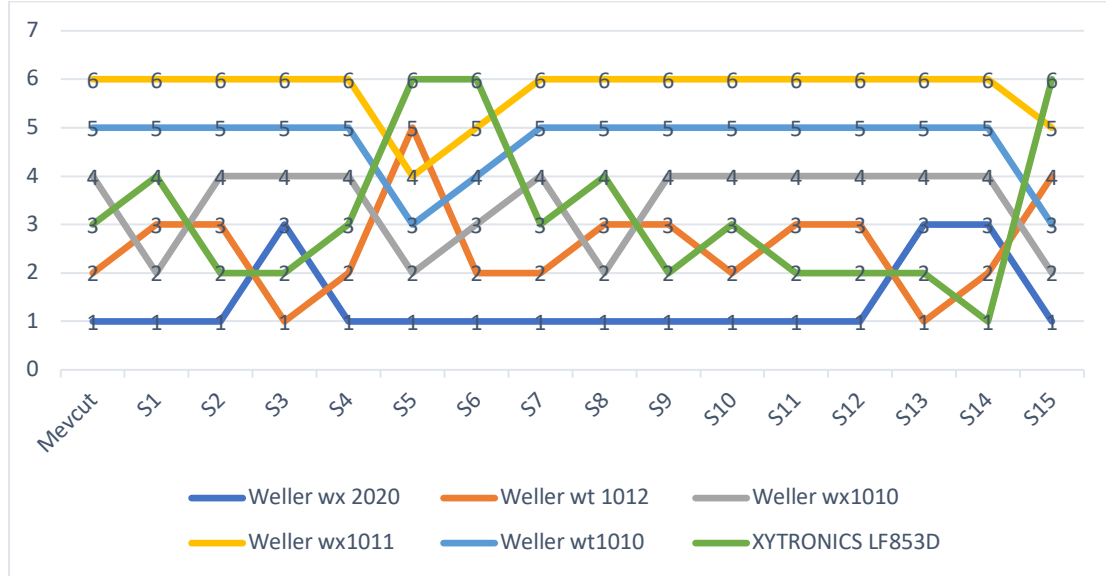


TOPSIS yöntemi ile yapılan duyarlılık sonuçları ise Şekil 6'da özetlenmektedir. Bu yöntemde benzer şekilde birinci ve sonuncu alternatiflerin senaryolara benzer reaksiyonlar gösterdiği görülmektedir. Özellikle ikinci, üçüncü ve dördüncü alternatiflerin kendi aralarında sürekli olarak yer değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 6. TOPSIS Yöntemi Duyarlılık Analizi Senaryolarına Göre Alternatif Sıralamaları

PROMETHEE yöntemi ile yapılan duyarlılık sonuçları ise Şekil 7'de özetlenmektedir. Duyarlılık analizinde kriter ağırlıklarının değişimlerine rağmen sıralamalar en az PROMETHEE yönteminde değişmiştir.



Şekil 7. PROMETHEE Yöntemi Duyarlılık Analizi Senaryolarına Göre Alternatif Sıralamaları

Elde edilen tüm sonuçlara göre çalışmada kullanılan iki yönteme göre birinci alternatif olarak Weller wx 2020 cihazı belirlenmiştir. Üç yöntem arasında duyarlılık analizine göre de alternatiflerin sıralamalarında PROMETHEE yönteminde önemli bir değişim olmamıştır. Bunun nedeni ise PROMETHEE yöntemi diğer yöntemlere göre gerek alternatifleri gerekse kriterler ile ilgili olarak daha fazla veri girişi ve buna göre sıralama yapma imkanı sunmasıdır. Duyarlılık analizi sonucuna göre de daha tutarlı sonuçlar vermesi nedeniyle karar vericilere PROMETHEE yönteminin sonuçlarını tercih etmesi önerilmektedir.

## 6. Sonuç

Günümüzde gerek hizmet gerekse üretim işletmeleri maliyet azaltmak ve rekabet avantajı sağlamak amacıyla üretim ve hizmet planı, lojistik ve satın alma gibi çeşitli süreçlere yönelik önemli karar verme faaliyetlerinde bulunmaktadır. İşletmeler mümkün olan en az maliyet ile elde edebileceği maksimum fayda için elindeki

imkanları kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışma da ise elektronik alanında mümkün olan en az maliyet ile en kaliteli hava seti seçilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışma da şirketin satın alınacağı hava setlerinin seçimi için belirlenen kriterler AHP yöntemiyle ağırlıklandırılmış, TOPSIS, COPRAS ve PROMETHEE yöntemi ile alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada kriterler, firmada uzun yıllardır çalışan uzman kişiler tarafından belirlenmiştir. Alternatifler ise piyasa araştırmaları neticesinde uzman önerileri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Üç farklı ÇÖKV yöntemi ile problem çözülmüştür. Her yöntemin algoritmik yapıları birbirinden farklıdır. TOPSIS yöntemi ile ilk sıralamalar elde edildikten sonra COPRAS yöntemi ile kriterler maliyet ve fayda açısından iki gruba ayrılarak çözüm elde edilmiştir. TOPSIS ve COPRAS yöntemleri ile elde edilen sıralamalar birbirinden farklılık göstermiştir. Ardından çözüm algoritmasında bir farklılık daha katarak tercih fonksiyonlarını dikkate alan PROMETHEE yöntemi ile çözüm elde edilmiştir. PROMETHEE yöntemi ile elde edilen sıralamada ise diğer iki yöntemle elde edilen çözümler ile ortak sıralamalar mevcuttur.

Ele alınan bu çalışma ile hava seti seçimi problemi için, kriterlerin alternatifler üzerindeki etkisinin belirlenmesi, karar alma süreçlerinde ortaya çıkabilecek zorluklara yardımcı olması ve çelişen görüşlerin değerlendirilmesi açısından karar verme sürecine bir çözüm önerisi sunulmuştur. Sonraki çalışmalarda karar vericilerin görüşlerinin uzlaşık olmaması ve belirsizlik durumları dikkate alınarak değerlendirmeler yapılması önerilmektedir.

### Araştırmacıların Katkısı

Çalışmada Emre Yazıcı problemin çözüm yöntemlerinin belirlenmesi ve makalenin hazırlanması, Ufukcan Ebiri problemin belirlenmesi, Berat Alperen Kızılay verilerin toplanmasını, Onur Oruç çözüm yöntemlerinin uygulanması, Hacı Mehmet Alakaş ise çalışmada metodoloji açısından uygunluğunu değerlendirilmesi açısından katkıda bulunmuşlardır.

### Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

### Kaynaklar

- Adar, T., & Kiliç Delice, E. (2020). Şehir içi toplu taşıma şoförlerinin toplam iş yüklerinin fiziksel ve zihinsel iş yükü ölçütlerine göre yeni bir yaklaşımla karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 254–267. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.93609>.
- Akça, B. A., Doğan, A., & Özcan, U. (2015). Analitik Hiyerarşi Süreci Kullanılarak Kişi Takip Cihazı Seçimi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 8(1), 20. <https://doi.org/10.17671/BTD.73079>.
- Alakaş, H. M., Yazıcı, E., Cebeci, S., Yılmaz, E. E., & Eren, T. (2021). Toplu Ulaşım Sistemlerinde Araç Tipi Seçimi: Kırıkkale Kampüs Hattı Örneği. *Kırıkkale Üniversitesi Sosyal Bilimleri Dergisi*, 11(1), 269–287. <https://dergipark.org.tr/pub/kusbd/issue/60105/796060>.
- Amiri, M., Ayazi, S. A., Olfat, L., & Moradi, J. (2011). Group Decision Making Process for Supplier Selection with VIKOR under Fuzzy Circumstance Case Study: An Iranian Car Parts Supplier. *International Bulletin of Business Administration*, 10.
- Bahraminasab, M., & Jahan, A. (2011). Material selection for femoral component of total knee replacement using comprehensive VIKOR. *Materials & Design*, 32(8–9), 4471–4477. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.03.046>.
- Baležentis, A., Baležentis, T., & Misiunas, A. (2012). An integrated assessment of Lithuanian economic sectors based on financial ratios and fuzzy MCDM methods. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(1), 34–53. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.656151>.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science*, 31(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/MNSC.31.6.647>.
- Deringöz, A., Danişan, T., & Eren, T. (2021a). Covid-19 Takibinde Giyilebilir Sağlık Teknolojilerinin ÇKKV Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.768219>.
- Deringöz, A., Danişan, T., & Eren, T. (2021b). Endüstriyel Giyilebilir Teknolojilerin ÇKKV Yöntemleri ile Değerlendirilmesi ve Seçimi. *Ergonomi*, 4(1), 10–21. <https://doi.org/10.33439/ERGONOMI.882303>.
- Falsafi, M., Terkaj, W., Guzzon, M., Malfa, E., Fornasiero, R., & Tolio, T. (2023). Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making. *Journal of Cleaner Production*, 402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136838>.

- Gavcar, E., & Kara, N. (2020). Elektrikli Otomobil Seçiminde Entropi ve TOPSIS Yöntemlerinin Uygulanması. *İş ve İnsan Dergisi*, 7(2), 351–359. <https://doi.org/10.18394/IID.695702>.
- İnanır, M., & Deste, M. (2021). KBRN Personel Koruyucu Elbise Seçimi Üzerine AHP ve VIKOR Yöntemleriyle Bir Uygulama. *R&S - Research Studies Anatolia Journal*, 4(3), 207–221. <https://doi.org/10.33723/RS.958894>.
- Kabassi, K., & Martinis, A. (2021). Sensitivity Analysis of PROMETHEE II for the Evaluation of Environmental Websites. *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 9215, 11(19), 9215. <https://doi.org/10.3390/APP11199215>.
- Kaya, İ., Kılınç, M. S., & Çevikcan, E. (2007). Makine-Techizat Seçim Probleminde Bulanık Karar Verme Süreci. *Mühendis ve Makina*, 49(576), 8–14. [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/2ccc96096d4281b\\_ek.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/2ccc96096d4281b_ek.pdf).
- Keçek, G., & Yüksel, R. (2016). Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve PROMETHEE Teknikleriyle Akıllı Telefon Seçimi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 49, 46–62. <https://dergipark.org.tr/pub/dpusbe/282175>.
- Kısa, C. G., & Perçin, S. (2017). Bütünleşik Bulanık DEMATEL-Bulanık VIKOR Yaklaşımının Makine Seçimi Problemine Uygulanması. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 12(48), 249–256. <https://doi.org/10.1007/S10845-015-1189-3>.
- Orçanlı, K., & Özen, Ü. (2013). Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden Ahp Ve Topsis'in E-Kitap Okuyucu Seçiminde Uygulanması. *Uşak Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 6(3), 282–311. <https://doi.org/10.12780/UUSBD250>.
- Özdağoğlu, A., Eren, F. Y., & Keleş, M. K. (2019). Bir Laboratuvarında Tam Kan Sayım Cihazı Alternatiflerinin SWARA, WPM, TODIM ve AHS Yöntemleri ile Değerlendirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 34(4), 511–526. <https://doi.org/10.24988/IJE.2019344881>.
- Perçin, S. (2012). Bulanık Ahs Ve Topsis Yaklaşımının MakineTehizat Seçimine Uygulanması. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 169–184. <https://dergipark.org.tr/pub/cusosbil/issue/4389/60337>.
- Piantanakulchai, M., & Saengkhaio, N. (2003). Evaluation of alternatives in transportation planning using multi-stakeholders multi-objectives AHP modeling. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 1613–1628.
- Pophali, G. R., Chelani, A. B., & Dhodapkar, R. S. (2011). Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach. *Expert Systems with Applications*, 38(9), 10889–10895. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2011.02.129>.
- Saaty, T. L. (1977). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill Inc.
- Samvedi, A., Jain, V., & Chan, F. T. S. (2012). An integrated approach for machine tool selection using fuzzy analytical hierarchy process and grey relational analysis. *International Journal of Production Research*, 50(12), 3211–3221. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.560906>.
- San Cristóbal, J. R. (2012). Contractor Selection Using Multicriteria Decision-Making Methods. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(6), 751–758. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000488).
- Shafabakhsh, G. A., Hadjihoseinlou, M., & Taghizadeh, S. A. (2014). Selecting the appropriate public transportation system to access the Sari International Airport by fuzzy decision making. *European Transport Research Review*, 6(3), 277–285. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0128-7>.
- Singh, R., Kumar, H., & Singla, R. K. (2013). TOPSIS Based Multi-Criteria Decision Making of Feature Selection Techniques for Network Traffic Dataset. *International Journal of Engineering and Technology*, 5(6), 4598–4604.
- Soba, M. (2012). PROMETHEE Yöntemi Kullanarak En Uygun Panelvan Otomobil Seçimi ve Bir Uygulama. *Journal of Yaşar University*, 28(7), 4708–4721. <https://doi.org/10.19168/jyu.39764>.
- Stević, Ž., Pamučar, D., Vasiljević, M., Stojić, G., & Korica, S. (2017). Novel Integrated Multi-Criteria Model for Supplier Selection: Case Study Construction Company. *Symmetry*, 9(11), 279. <https://doi.org/10.3390/SYM9110279>.
- Tayyar, N., & Pınar, A. (2013). Hazır Giyim Sektöründe En İyi Fason İşletme Seçimi İçin AHP ve VIKOR. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(1), 340–358. <https://dergipark.org.tr/pub/cbayarsos/53609>.
- Topoyan, M., Güler, M. E., & Gürler, İ. (2008). İklimlendirme Sistemi Seçiminde Bulanık AHS Uygulanması. *VIII. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 71–79. <https://docplayer.biz.tr/4780359-Iklimlendirme-sistemi->

[seciminde-bulanik-ahs-uygulamasi.html](https://dergipark.org.tr/tr/pub/best/777576).

Turgut, Z. N., Danişan, T., & Eren, T. (2020). Spor yapanlar için en uygun akıllı saatin AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile seçimi. *Uluslararası Beden Eğitimi Spor ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 1–11. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/best/777576>.

Tzeng, G. H., Lin, C. W., & Opricovic, S. (2005). Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, 33(11), 1373–1383. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.12.014>.

Uğur, L. O., Erdal, M., & Üçkardeşler, A. (2018). Çatı Kaplama Malzemesi Seçiminde VIKOR Çok Kriterli Karar Verme Yönteminin Uygulanması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7(2), 117–130. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/411282>.

Wang, L., Ali, Y., Nazir, S., & Niazi, M. (2020). ISA Evaluation Framework for Security of Internet of Health Things System Using AHP-TOPSIS Methods. *IEEE Access*, 8, 152316–152332. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3017221>.

Wang, T. C., & Chang, T. H. (2007). Application of TOPSIS in evaluating initial training aircraft under a fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 33(4), 870–880. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2006.07.003>.

Yazıcı, E., Üner, S. İ., Demir, A., Dinler, S., & Alakaş, H. M. (2022). Evaluation of supply sustainability of vaccine alternatives with multi-criteria decision-making methods. *International Journal of Health Planning and Management*. 37(4), 2421-2444. <https://doi.org/10.1002/HPM.3481>.

Zavadskas, E. K., & Kaklauskas, A. (1996). Determination of an efficient contractor by using the new method of multicriteria assessment. In *International Symposium for 'The Organization and Management of Construction'. Shaping Theory and Practice 2*, 94–104.

Zavadskas, Edmundas Kazimieras, Kaklauskas, A., & Sarka, V. (1994). The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1(3), 131–139.



# Journal of Turkish Operations Management

## Dijital dönüşümde proje yönetim sistemine yönelik bir araştırma: Bulanık AHP ve bulanık MAIRCA yaklaşımı

Emine Elif Nebati<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
emine.nebati@izu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3950-4279>

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 12.09.2023  
Revize: 09.11.2023  
Kabul: 11.12.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Dijital Dönüşüm,  
Proje Yönetimi,  
Bulanık AHP,  
Bulanık MAIRCA

### ÖZET

Firmalar, projeler için süre ve iş dağılımı gibi konularda planlamaya yardımcı, projedeki hedefleri takip ve kontrol etmeyi kolaylaştırıcı proje yönetimi sistemlerini kullanmaktadır. Proje yönetimi, tüm sektörler için kritik öneme sahip bir konudur. Son yıllarda, dijital dönüşüm tüm iş alanlarında olduğu gibi proje yönetiminde de değişikliklere yol açmıştır. Teknolojinin hızlı gelişimi ile, Geleneksel proje yönetimlerine alternatif olarak, yeni proje yönetim sistemleri tercih edilmeye başlanmıştır. Firmalar, uygun proje yönetim sistemleri seçimi ile verimliliklerini arttırmak, rekabette söz sahibi olmak istemektedir. Bu çalışmanın temel amacı dijital dönüşümün proje yöneticileri için getirdiği yenilikleri göz önünde bulundurarak, proje yönetimi süreçlerinde dijital dönüşüm için ihtiyaç duyulan faktörler üzerinde önceliklendirme yapmak, bir işletme için uygun proje yönetim sistemi seçimi yapmaktır. Bu amaç doğrultusunda, araştırma analizleri çerçevesinde Bulanık AHP ve Bulanık MAIRCA tercih edilmiştir. Çalışmanın özgünlüğü, önerilen metodolojinin bu alanda kısıtlı örneği bulunmasıdır. Böylelikle, sektördeki karar vericilere yardımcı olacağı umulmaktadır. Ayrıca, önerilen Bulanık MAIRCA yaklaşımı ile yazına katkı sağlanacağı umulmaktadır.

## A research on project management system in digital transformation: Fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA approach

### Article Info

#### Article History:

Received: 12.09.2023  
Revised: 09.11.2023  
Accepted: 11.12.2023

#### Keywords:

Digital Transformation,  
Project Management,  
Fuzzy AHP,  
Fuzzy MAIRCA

### Abstract

Companies use project management systems that help planning on issues such as duration and work distribution for projects and facilitate tracking and controlling the objectives in the project. Project management is a critical issue for all sectors. In recent years, digital transformation has led to changes in project management as in all business areas. With the rapid development of technology, new project management systems have started to be preferred as an alternative to traditional project management. Companies want to increase their productivity and have a say in competition by choosing appropriate project management systems. The main purpose of this study is to prioritise the factors needed for digital transformation in project management processes, considering the innovations brought by digital transformation for project managers, and to choose the appropriate project management system for a business. For this purpose, Fuzzy AHP and Fuzzy MAIRCA were preferred within the framework of research analyses. The originality of the study is that the proposed methodology has limited examples in this field. Thus, it is hoped that it will help decision makers in the sector. It is also hoped that the proposed Fuzzy MAIRCA approach will contribute to the literature.



## 1. Giriş

Son yıllarda teknolojik gelişmelerin hızlanması, dünya düzeninin değişmesi ve artan rekabet ile birlikte dijital dönüşüm kavramı şirketler için daha da önemli hale gelmiştir. Dijital dönüşüm girişimlerinde başarının ön koşullarından bazıları, stratejik planlama ve ihtiyaca uygun stratejiler ile uygun ve etkin iş süreçlerinin tasarlanması ve yönetilmesi, doğru yatırımlar yapmak, yeterli ve nitelikli kadrolar kurmaktır. Firmaların çeşitli sektörlerde dijital dönüşüm faaliyetlerini gerçekleştirmektedir.

Son yıllarda, yazılım sektöründeki hızlı gelişmeler, şirketleri iş süreçlerinde de dijital dönüşümle entegre yeni yöntemler aramaya yönlendirmiştir. Süreç ve sistemlerin dijital dönüşümü yazında iki açıdan değerlendirilmiştir. İlk olarak, üretimden ürünlerin/hizmetlerin son kullanıcıya ulaşmasına kadar ki süreçlerdir. Diğer ise, süreç ve sistemlerin dijital dönüşümü, şirket içerisindeki işlemlerde iş süreçlerinin dijital dönüşümüdür (Peker,2022). İş gücü ve zaman kayıplarının azaltılması, risklerin minimize edilmesi, verimliliği artırma, kaynak kullanımını azaltma ve finansal kazanımların sağlanması, iş süreçlerinin dijital dönüşümüyle hızlandırılabilir. Yazılım sektöründeki şirketler de bu dönüşüm sürecinde rekabet hızının artması, dijital çağın hızlı değişimi ile geleneksel proje yönetimi yaklaşımları yerine yeni proje yönetim sistemlerine yönelmek istemektedirler.

Proje yönetimi, projenin hedeflerine ulaşması sürecini kontrol etmektedir (Munns ve Bjeirmi, 1996). Proje başarısı, kurumlar üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Proje yönetim sistemleri de proje başarısında etkili önemli faktörlerden biridir. Bu yüzden projede seçilecek sistem detaylı bir şekilde incelenmeli ve projenin yapısına uygun olmalıdır. Capture (2021) tarafından proje yönetim süreçlerinde dijitalleşmenin kullanılması şirketlerde “başarıyı hızlandırıcı” olarak tanımlanmıştır. Bu dönüşüm sürecinde, doğru sistemler seçilmeye çalışılırken süreci bazı faktörlerde göz önünde bulundurulmalıdır. Dijital dönüşümde profesyonel proje yönetiminde başarı için, stratejik öngörü, risk yönetimi, değişim ve yeniliğe açıklık, bütçe ve insan kaynağının doğru kullanımı gibi faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu süreçte, seçilen sistemlerin proje gereksinimlerine uyumlu olması gerekmektedir.

Proje yönetimi, işletmelerin hedeflerine ulaşmak ve projeleri başarılı bir şekilde tamamlamak için kullanılan önemli bir disiplindir. Bu projelerin yönetiminde kullanılan metodolojiler arasında Waterfall (Çağlayan) ve Agile (Çevik) gibi farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Waterfall proje yönetimi, geleneksel ve sıralı bir yaklaşımı temsil eder. Bu yöntem, bir projenin belirli aşamalarının sırayla tamamlanmasını gerektirir. Waterfall proje yönetim sistemi, belirli projeler için uygun olabilir ve özellikle karmaşık ve büyük ölçekli projelerde kullanılır. Waterfall yaklaşımının temel avantajlarından biri, projenin başlangıcından sonuna kadar belirsizlikleri minimize etmeye yardımcı olmasıdır (Wysocki, 2014). Waterfall yaklaşımının bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle hızlı değişen pazarlarda veya teknolojilerde, bu yaklaşımın esnekliği eksik olabilir. Ayrıca, müşteri geri bildirimlerini dikkate almak ve projeyi daha fazla uyarlamak zor olabilir. Agile proje yönetimi, özellikle hızlı değişen pazarlarda ve yazılım geliştirme projelerinde kullanılan popüler bir yöntemdir. Bu yaklaşım, müşteri odaklıdır ve müşteri geri bildirimlerini değerli bir şekilde kullanmayı vurgular. Ayrıca, proje ekibi üyeleri arasındaki iş birliğini teşvik eder ve hızlı teslimatı hedefler (Schwaber & Sutherland, 2017). Dezavantajı ise, Özellikle belirsiz projelerde veya büyük ölçekli projelerde, Agile yaklaşımı yönetim zorluklarına yol açabilir. Agile yaklaşımında en sık tercih edilen sistemler ise, Kanban, Extreme Programming (XP) ve Scrum'dır.

Bu çalışmada, yazılım sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın iş sürecinin dijital dönüşümünde uygun proje yönetim sistemi seçimi problemi ele alınmıştır. Çalışmada, firmada hangi proje sisteminin öncelikli olarak hayata geçirilmesinin daha faydalı olacağı sorusuna cevap aranmış ve bir çözüm modeli önerilmiştir. Önerilen çözümde, kriterlerin önceliklendirilmesinde yazında geçerliliği kabul edilmiş Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (B-AHP) ve proje yönetim sistemlerinin sırlanmasında ise, özellikle ulusal yazında kısıtlı örneği bulunan Bulanık MultiAttributive Ideal-Real Comparative Analysis- Çok Nitelikli İdeal Gerçek Karşılaştırmalı Analiz (B-MAIRCA) yöntemi tercih edilmiştir. Söz konusu firmada mevcut durumda kullanılan proje yönetim sistemleri ile analiz neticesinde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında benzer sıralamaların elde edildiği görülmüştür. Bu durumun önerilen çözüm modelinin doğruluğunu destekler nitelikte olduğu söylenebilir.

Çalışmanın ikinci bölümünde literatür taraması gerçekleştirilmiş ve proje yönetim sistemleri ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde, çalışma kapsamında uygulanan Bulanık Çok Kriterli Karar Verme metodları hakkında bilgi verilmiş ve uygulama adımları anlatılmıştır. Çalışmanın dördüncü bölümünde, Türkiye’de yazılım sektöründe faaliyet gösteren bir şirket için dijital dönüşümde proje yönetim sistemi seçimi değerlendirilmiştir. Son bölümde ise, proje seçimi ve önceliklendirmesiyle ilgili elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. Literatür Taraması

Çalışmanın bu bölümünde, ulusal ve uluslararası kaynaklarda son yıllarda öne çıkan çalışmalara yer verilmiştir.

Ömürbek ve arkadaşları, bir üniversite için bilgi işlem daire başkanlığında kurumsal proje yönetimi yazılım geliştirmede AHP ve TOPSİS yöntemlerini tercih etmiştir. Agile ve Scrum desteğini en iyi şekilde yansıtan kurumsal proje yönetim (EPM) aracının kullanılmasına karar verilmiştir (Ömürbek vd., 2015). Erdem ve Younis, yazılım projelerinin yönetimi ile ilgili proje yönetimi ve gerekli risk kuramları belirlemiş, yazılım projelerinin başarıyla sonuçlandırılması için öneriler sunmuştur (Erdem ve Younis, 2014). Gencer ve Kayacan, çalışmada Waterfall ve Agile proje yönetimi tekniklerini karşılaştırmış; proje gereksinimleri, ortaya çıkarılan ürün, kaynak kullanımı, organizasyonel yapı gibi açılardan incelendiğinde iki tekniğin de kendine has güçlü olduğu yönlerinin olduğu belirtilmiş, proje bazında değerlendirme yapılması gerekliliği vurgulanmıştır (Gencer ve Kayacan, 2017). Elibol ve Erol çalışmada, oyun sektöründe Scrum proje yönetim metodunun uygulanması hakkında araştırma yapmıştır. Scrum proje yönetiminde roller, müşterinin isteği ile değişen proje kapsamının adaptasyonu hakkında bilgiler verilmektedir (Elibol ve Erol, 2017: 169). İsmail ve Mansor, çalışmada Agile proje yönetiminde yaşanan zorluklarla ilgili inceleme yapmıştır. Yazılım projelerinde çevik proje yönetimi metodolojisi uygulanırken karşılaşılan problemlerden bahsedilmiştir (İsmail ve Mansor, 2018). Aydın ve arkadaşları, yazılım projelerinde çalışan kişilerden faydalanılarak Scrum proje yönetimi sisteminin kullanıldığı firmaların başarı düzeyleri araştırılmış ve Scrum proje yönetimi sisteminin şirket projelerinde verimliliği artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. (Aydın vd., 2020). Borandağ ve Yücalar, çalışmada web ve AR (augmented reality) tabanlı Scrum proje yönetimi uygulamalarını karşılaştırmış; kullanılan modüller ve teknolojik altyapı açısından web tabanlı Scrum proje yönetimi uygulamasının kullanım kolaylığı, projede kimin hangi işi sürdürdüğü bilgisinin daha açık ve anlaşılır bir şekilde görülebiliyor olması gibi konulardan ötürü daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir (Borandağ ve Yücalar, 2020). Başak çalışmasında, IT sektöründe klasik proje yönetimin başarısızlıklarından, müşteri gereksinimlerine hızlı cevap verilmesine olanak sağlayan çevik proje yönetim metodolojisi olan Scrum tekniğinden bahsetmiştir (Başak, 2020). Tiryaki çalışmasında, çevik yönetim metodlarından olan Aşırı Programlama, Scrum, Rasyonel Birleştirilmiş Süreç ve Kanban yöntemlerinin yazılım projelerinde değerlendirilmesi ve karşılaştırılması yapılmıştır. Proje yönetim metodolojilerin ilerleyişi hakkında bilgi vermektedir (Tiryaki, 2021). Özcan ve Büçğün, çalışmada bluetooth kulaklık üretimi yapan bir firmada oluşan proje yönetimi ihtiyacına yönelik bir araştırma yapmıştır. Proje yönetiminin gerekliliği saptanmış olup, projenin tamamlanma süresi, işgücü ihtiyacı, kapasite ve zaman planlaması proje yönetimi uygulamaları sayesinde net bir şekilde tespit edilmiştir (Özcan ve Büçğün, 2021). Çalışkan ve arkadaşları, proje yönetim sistemlerinin kullanımı ile ilgili bir anket gerçekleştirmiş; kalite ve verim açısından çevik yöntemlerin kullanımının çok daha yaygın olduğu tespit edilmiştir. (Çalışkan vd., 2021). Marnada ve arkadaşları, çalışmada çevik proje yönetiminin zorluklarından bahsetmiştir. Çevik proje yönetiminde projenin kapsamı ve değişikliğin yürütülmesindeki zorlukları incelemiştir. Proje yönetimindeki en büyük zorluğun organizasyon, kullanıcı gereksinimi önceliklendirme, kapsam dışı gereksinim ve iletişimden kaynaklandığı bulunmuştur (Marnada vd., 2022). Peker çalışmasında, firmaların iş süreçlerinin dijital dönüşümünde proje seçimi gerçekleştirmiştir. (Peker, 2022). Eren çalışmasında, proje yönetimi süreçlerinde dijital dönüşüm için ihtiyaç duyulan faktörler üzerinde önceliklendirme yapılmıştır (Eren, 2022). Kadenic ve arkadaşları, Scrum proje yönetim metodolojisinin temel bileşenlerin rolü ve etkisi hakkında araştırma yapmıştır. Dört temel bileşen olarak, ekip yapısı, Scrum değerleri, Scrum rolleri ve Scrum olaylarını ele almıştır. Araştırma sonucuna göre, bu bileşenlerin takımın olgunlaşmasını ve ekibin karar vermesini sağlamada olumlu bir şekilde etkilediğine ulaşılmıştır (Kadenic vd., 2023). İncelenen çalışmalar sonucunda,

Mevcut çalışmanın literatüre katkıları ve çıkarımları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- ✓ Bu çalışmada, Bulanık AHP yöntemi ve Bulanık MAIRCA yöntemleri bütünlük kullanılması önerilmiştir. Hibrit Bulanık ÇKKV yaklaşımıyla ilgili analitik bir çerçeve sunulmuştur.
- ✓ Önerilen metodolojinin yazında çok kısıtlı örneği olması sebebiyle yazına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.
- ✓ Geçmiş çalışmalar incelendiğinde proje yönetim sistemleri ile ilgili çeşitli çalışmalar olduğu, iş süreçlerinin dijital dönüşüm projeleri ile ilgili oldukça az çalışma bulunduğu görülmüştür. Bu durum çalışmanın özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Çalışma ile, hem literatüre hem araştırmacılara katkı sağlayacağı umulmaktadır
- ✓ Çalışmada önerilen modelin sonucu duyarlılık analizi ile test edilmiştir.

### 3. Yöntem

Bu bölümde analizde kullanılan yöntemlerin teorik altyapısına yer verilmiştir.

#### 3.1. Bulanık AHP yöntemi

Bulanık AHP, belirli kriterlere göre en iyi seçeneği belirlemek için bulanık küme teorisini AHP algoritmasına uygulayan bir tekniktir. Bu yöntem Chang'ın (1996) rank analizine dayanmaktadır. Birçok araştırmacı bu yöntemin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur (Karakul, 2019). Özellikle problemlerin tam olarak tanımlanmadığı veya bu problemlerin çözülmesinin belirsizlik durumunda karar vermeye tam uygun olmadığı durumlarda AHP' nin bulanık mantıkla birleştirilmesiyle Bulanık Analitik Hiyerarşik Süreci (Fuzzy AHP) ortaya çıkarılmıştır. (Kiraz vd., 2018)

Bu yöntem, karar vermede nicel ve nitel kriterleri değerlendirebilen matematiksel bir yöntemdir.. Bulanık AHP, ikili karşılaştırma prosedüründeki belirsizliği ve özneliği belirtmek için AHP'nin yetersiz kaldığı durumları iyileştirmiştir. (Söyler ve Pirim, 2014). Yazında çeşitli alanlarda uygulamaları mevcuttur (Wang ve diğ., 2012; Majumdar ve diğ., 2020; Çalık,2021). Çok kriterli karar verme problemlerinin Bulanık AHP metodu ile modellenmesinde aşağıdaki adımlar sırasıyla takip edilir (Chang, 1996; Şahin ve Ayvaz, 2020; Kahraman vd., 2004; Tayyar 2012;).Elemanların kümesinin  $X = x_1, x_2 \dots x_n$  ve amaç kümesinin de  $U = u_1, u_2 \dots u_n$  olduğu kabul edilsin. Chang'ın (1996) mertebeye analizi yöntemine göre,  $M_{gi}^j (j = 1,2,3 \dots m)$  üçgensel bulanık sayılardır.

**1.Adım:** Her bir eleman için aşağıda gösterildiği gibi m derece analizi değeri elde edilir: Bulanık sentetik derecenin değeri i. değere göre eşitlik (1)'de verildiği şekliyle hesaplanır:

$$S_i = \sum_{j=1}^n M_{gi}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$  İfadesini elde etmek için m dereceden analiz değerlerinin bulanık ilave matrisinde özel bir matris kullanılır. Bu matrisin matematiksel ifadesi gösterildiği gibidir:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{i=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (2)$$

Burada çarpımın ikinci kısmı olan  $\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1}$  matematiksel ifadesini elde etmek için  $M_{gi}^j (j=1,2, \dots, m)$  değerlerinin bulanık ilave işlemi aşağıdaki gibi gösterilir:

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = (\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{i=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j) \quad (3)$$

Eşitlik 4'de ki vektörün tersi ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n M_{gi}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4)$$

**2.Adım:** Karşılaştırılması yapılacak  $M_1$  ve  $M_2$  olmak üzere iki küme olsun.  $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$  eşitliğinin olabirlik derecesi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} [\min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y))] \quad (5)$$

Bu ifade eşitlik 6'ya eşittir:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d)$$

$$= \begin{cases} 1, & \text{eğer } m_2 \geq m_1, \\ 0, & \text{eğer } l_1 \geq u_2, \end{cases} \quad (6)$$



$$\frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} \text{ diğer durumlarda}$$

Burada  $d$  değeri,  $\mu_{M_1}$  ve  $\mu_{M_2}$  arasındaki en yüksek kesişim değerine sahip noktanın ordinatıdır.  $M_1$  ve  $M_2$ 'nin karşılaştırılabilmesinde  $V(M_1 \geq M_2)$  ve  $V(M_2 \geq M_1)$  değerlerine ihtiyaç duyulur.

**3. Adım:** Konveks bulanık bir sayının,  $k$  tane konveks bulanık sayı  $M_i$  ( $i=1,2,\dots,k$ )'den büyük olmasının olası derecesi aşağıda gösterildiği gibi tanımlanır:

$$\begin{aligned} V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) \\ &= V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] \\ &= \min V(M \geq M_i), i=1, 2, 3, \dots, k. \text{ Varsayalım, } k=1,2,3, \dots, n; k \neq i \text{ için:} \end{aligned} \quad (7)$$

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad (8)$$

Bu durumda ağırlık vektörü aşağıdaki gibi olur:

$$W^* = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T$$

$A_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ )  $n$  elemanlıdır.

**4. Adım:** Normalizasyon yapılarak normalize edilen ağırlık vektörü:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \text{ W bulanık olmayan bir sayıdır} \quad (9)$$

### 3.2. Bulanık MAIRCA

MAIRCA, Pamucar ve diğ. tarafından 2014 yılında geliştirilmiştir (Pamucar ve diğ., 2018). Bulanık MAIRCA yöntemi ise, MAIRCA metodundaki belirsizliklerden yola çıkarak 2020 yılında geliştirilmiştir (Boral vd., 2020). Karar vericilerin kriterlerin fayda ya da maliyet gibi nitelikleri hakkında bilgi aranmamaktadır. Yöntem yeni olmakla beraber kısıtlı alanda örnekleri bulunmaktadır (Ayadi vd.,2021; Gül ve Ak ,2020: 1231; Gül vd., 2021; Yıldızbaşı vd., 2021]. Bulanık Mairca adımları sırasıyla verilmiştir [Boral vd.,2020: Yıldızbaşı vd.,2021).

**Adım 1:** Öncelikle, alternatiflerin dilsel ifadelerle değerlendirilmesi sonucu olarak dilsel karar matrisi ( $D_L$ ) Eşitlik 10'da oluşturulmuştur.  $L_{mn}^k$   $m$  kadar alternatifin  $n$  kadar kriter altında  $k$  kadar değerlendirildiğini ifade eder.

$$D_L = \begin{pmatrix} L_{11}^1 & \dots & L_{1n}^k \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1}^1 & \dots & L_{mn}^k \end{pmatrix} \quad (10)$$

**Adım 2:** İlk adımdaki, dilsel karar matrisi kullanılarak bulanık sayılar ile değiştirilir.

$$\begin{aligned} \tilde{D}^{(1)} &= \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11}^{(1)} & \tilde{A}_{12}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(1)} \\ \tilde{A}_{21}^{(1)} & \tilde{A}_{22}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(1)} & \tilde{A}_{m2}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(1)} \end{bmatrix}, \dots, \\ \tilde{D}^{(k)} &= \begin{bmatrix} \tilde{A}_{11}^{(k)} & \tilde{A}_{12}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(k)} \\ \tilde{A}_{21}^{(k)} & \tilde{A}_{22}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(k)} & \tilde{A}_{m2}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

**Adım 3:** Ağırlıklar kullanılarak Eşitlik 12'deki bütünleşik karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \cdots & \tilde{A}_{1m} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \cdots & \tilde{A}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \cdots & \tilde{A}_{mn} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Böylece,  $\tilde{A}_{11} = (\tilde{A}_{11}^{(1)} + \tilde{A}_{11}^{(2)} + \dots + \tilde{A}_{11}^{(k)}) / k$  şeklinde hesaplanır.

**Adım 4:**  $P_{Ai}$  seçimine göre tercih belirlenir. Herhangi bir tercih eşit olasılıkla seçilebildiğinden, alternatiflerin her biri için tercihler Eşitlik 13 ile gösterilir.

$$P_{Ai} = \frac{1}{m}; \sum_{i=1}^m P_{Ai} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (13)$$

**Adım 5:** Bulanık teorik değerlendirme matrisi  $(\tilde{T}_{PA})$  tanımlı ağırlıklar ve  $(P_{Ai})$  çarpılması ile elde edilir.

$$(\tilde{T}_{PA}) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \cdots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \\ \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \cdots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \cdots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_{p11} & \tilde{t}_{p12} & \cdots & \tilde{t}_{pn1} \\ \tilde{t}_{p21} & \tilde{t}_{p22} & \cdots & \tilde{t}_{pn2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{pm1} & \tilde{t}_{pm2} & \cdots & \tilde{t}_{pmn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

**Adım 6:** Hesaplamalarda sayısal gösterimin güvenilirliğini arttırmak için Eşitlik 15'de denklemler ile normalizasyon yapılır.

$$\begin{aligned} n_{ij}^l &= \frac{a_{ij}^l}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \\ n_{ij}^m &= \frac{a_{ij}^m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \\ n_{ij}^u &= \frac{a_{ij}^u}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \end{aligned} \quad (15)$$

**Adım 7:** Teorik hesaplama matrisinin bulanık ögeleri hesaplanır. Eşitlik 16'da normalize karar matris ögeleri ve teorik hesaplama matris ögeleri çarpılır.

$$\tilde{T}_{rA} = \begin{pmatrix} \tilde{t}_{r11} & \tilde{t}_{r12} & \cdots & \tilde{t}_{rn1} \\ \tilde{t}_{r21} & \tilde{t}_{r22} & \cdots & \tilde{t}_{rn2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{rm1} & \tilde{t}_{rm2} & \cdots & \tilde{t}_{rnm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{p11} & \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{p12} & \cdots & \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{pn1} \\ n_{21} \otimes \tilde{t}_{p21} & n_{22} \otimes \tilde{t}_{p22} & \cdots & \tilde{n}_{12} \otimes \tilde{t}_{pn2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} \otimes \tilde{t}_{pm1} & n_{m2} \otimes \tilde{t}_{p22} & \cdots & \tilde{n}_{nm} \otimes \tilde{t}_{pn2} \end{pmatrix} \quad (16)$$

**Adım 8:** Her kritere göre her alternatifin değerlendirmesi arasındaki boşluk hesaplanır. Toplam boşluk matrisi Eşitlik 17 ile oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \cdots & \tilde{A}_{1m} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \cdots & \tilde{A}_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \cdots & \tilde{A}_{mn} \end{pmatrix} \quad (17)$$

**Adım 9:** Son adımda, her kritere göre her alternatifin boşluk değerleri toplanarak kriter fonksiyonlarının nihai değeri hesaplanır. Değerler büyükten küçüğe sıralanır.

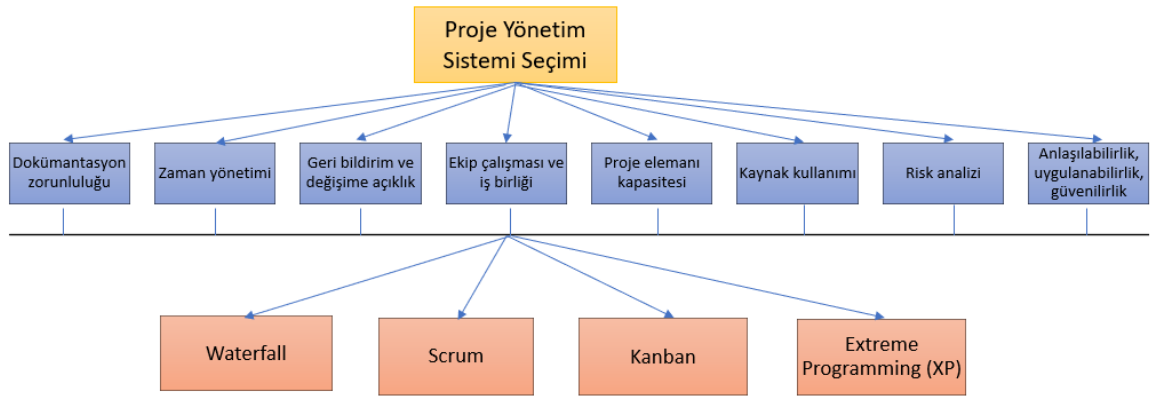
$$P_{Ai} = \frac{1}{m}; \sum_{i=1}^m P_{Ai} = 1 \quad (18)$$

#### 4. Uygulama

Önerilen bütünleşik çözüm yöntemi Türkiye’de yazılım sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın dijital dönüşüm sürecinde proje yönetim sistemi seçimine uygulanmıştır. Firma, dijital dönüşüm sürecinde hali hazırda kullandığı ve kullanmak istediği proje yönetim sistemlerini değerlendirmek istemektedir. Öncelikle şirkette mühendis konumunda 3 karar verici belirlenmiştir. Karar verici bilgilerinden ve yazındaki çalışmalardan faydalanılarak dönüşüm sürecinde değerlendirilmesi istenen sekiz kriter ve Waterfall, Scrum, Kanban, Extreme Programming (XP) olmak üzere 4 proje yönetim sistemi karşılaştırılmıştır. Önerilen model Şekil 1 ve kriter açıklamaları Tablo 1’de verilmiştir. Uygulama çalışmasının adımları aşağıda verilmiştir.

#### 4.1. Bulanık AHP Yöntemiyle Kriter Ağırlıklarının Elde Edilmesi

**1. Adım:** Çalışma kapsamında yazındaki çeşitli araştırmalardan ve faydalanılarak 8 kriter ve 4 alternatif belirlenmiştir. Önerilen hiyerarşik model yapısı Şekil 1’de paylaşılmıştır. Dijital dönüşümde, proje yönetimi sistemi seçimi için belirlenen kriter açıklamaları ise Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 1. Önerilen Hiyerarşi Modeli

Tablo 1. Kriter açıklamaları

<b>Dokümantasyon zorunluluğu (K1)</b>	Gereksinimlerin, ilerlemenin ve verilen kararların belgelendirilmesi gerekmektedir (Gencer ve Kayacan, 2017).
<b>Zaman yönetimi (K2)</b>	İlgili projedeki adımların bir süreye bağlı olup olmaması.
<b>Geri bildirim ve Değişime Açıklık(K3)</b>	Adım adım ilerlenen tekniklerde geriye dönülmez, değişiklik yapılmaz. Agile’da sürekli iyileştirme, geliştirme uygulaması vardır. (Gencer & Kayacan, 2017), Projedeki ilerlemenin görülebilmesi ve rapor edilmesi için belirli periyotlarla bilgi verilmesi projenin devamlılığı açısından fayda sağlar (Yücalar ve Borandağ, 2019).
<b>Ekip çalışması ve iş birliği(K4)</b>	Proje yürütücüleri ve bu projenin takibini yapan kişiler arasında bilgi akışının yapılabilir ve bunun sürece entegre edilebilir olması. (Yücalar & Borandağ, 2019).
<b>Proje elemanı kapasitesi(K5)</b>	Tecrübe ve Yetenekler, Alan Bilgisi gibi özellikler proje yönetim metodolojisi seçiminde kritik öneme sahiptir (Çalışkan vd., 2021).
<b>Kaynak kullanımı (K6)</b>	Projeyi iyi çözüme götüren kaynaklara öncelik verilmesi, bunların optimum düzeyde kullanılmasının tespitinin sağlanmasına olanak verme yetkinliği. (Alma vd.,2016)
<b>Risk analizi (K7)</b>	Risk faktörlerinin belirlenmesi ve önceliklendirilmesi, risk faktörünün gerçekleşme ihtimali ile potansiyel etkisinin analizi (Gencer ve Kayacan, 2017)
<b>Anlaşılabilirlik, Uygulanabilirlik,</b>	Projede kullanılacak yapılan çalışmanın daha basit ve karmaşık çözümler yerine daha uygulanabilir olması, bu bağlamda da müşteriye yapılan çalışmanın güven vermesi önemli yere sahiptir (Özcan ve Büçğün, 2021).

**Güvenilirlik  
(K8)**

**2. Adım:** Firmada proje yöneticiliğinde görev yapan üç uzmandan kriterleri değerlendirmeleri istenmiştir. Karşılaştırma matrisi buna göre geliştirilmiştir. Karar vericilere, değerlendirilmede kullanılmak üzere Tablo 2'deki ölçek sunulmuştur. Üç Karar verici, kriterleri Tablo 2'ye göre karşılaştırdıktan sonra geometrik ortalamaları alınarak elde edilen değerler Tablo 3 karşılaştırma matrisinde verilmiştir.

**Tablo 2.** Chang yöntemine göre BAHP'de kullanılan ölçek (Chang, 2006)

Sözel Tanım	Sayı	Bulanık Sayılar	Karşılık Sayılar
Eşit öneme sahip	1	(1,1,1)	(1,1,1)
Ara Değer	2	(1,2,4)	(1/4,1/2,1)
Biraz daha fazla önemli	3	(1,3,5)	(1/5,1/3,1)
Ara Değer	4	(2,4,6)	(1/6,1/4,1/2)
Kuvvetli derecede önemli	5	(3,5,7)	(1/7,1/5,1/3)
Ara Değer	6	(4,6,8)	(1/8,1/6,1/4)
Çok kuvvetli derecede önemli	7	(5,7,9)	(1/9,1/7,1/5)
Ara Değer	8	(6,8,9)	(1/9,1/8,1/6)
Tamamıyla önemli	9	(7,9,9)	(1/9,1/9,1/7)

**Tablo 3.** Bulanık sayılarla oluşturulmuş kriterlerin kendi aralarında ikili karşılaştırmalar matrisi

	K1	K2	K3	K4
K1	(1,1,1)	(6.26,8.28,9)	(2.92, 5.28, 7.4)	(5.59, 7.61, 9)
K2	(0.11, 0.12, 0.16)	(1,1,1)	(1.91, 2.08,2.08)	(1, 1, 1)
K3	(0.14, 0.19,0.14)	(0.48, 0.48,0.48)	(1,1,1)	(1, 1.44, 1.71)
K4	(0.11, 0.13, 0.18)	(1,1,1)	(0.58 0.69, 1)	(1, 1.44, 1.71)
K5	(0.12, 0.14, 0.19)	(0.11, 0.11, 0.19)	(0.15, 0.19, 0.36)	(0.18, 0.28,0.69)
K6	(0.12, 0.14, 0.19)	(0.25, 0.25, 0.36)	(0.2, 0.33, 1)	(1, 1, 1)
K7	(0.12, 0.16, 0.24)	(0.34, 0.34, 1)	(0.52, 0.58, 0.69)	(0.84, 1.19, 0.91)
K8	(0.13, 0.18, 0.28)	(0.15, 0.15, 0.41)	(0.18, 0.28, 0.69)	(0.44, 0.69, 1.33)
K1	K5	K6	K7	K8
K2	(5.28, 7.40, 8.28)	(5.28, 7.40, 8.28)	(4.22, 6.26, 8.28)	(3.56, 5.59, 7.61)
K3	(5.59, 7.61,9.00)	(2.76, 3.56, 3.98)	(1, 2.08, 2.92)	(2.47, 4.72, 6.80)
K4	(2.76, 5.13,6.80)	(1, 3, 5)	(1.44, 1.71, 1.91)	(1.44, 3.56, 5.59)
K5	(1.44, 3.56,5.59)	(1.44, 2.47, 3.27)	(1.44, 2.47, 3.27)	(2.08, 4.22, 6.26)
K6	(1,1,1)	(2.47, 4.72, 6.80)	(2.08, 4.22, 6.26)	(3, 5, 7)
K7	(0.15, 0.21, 0.41)	(1, 1, 1)	(1.44, 3.56, 5.59)	(1.44, 2.47, 3.27)
K8	(0.16, 0.24,0.48)	(0.18, 0.28, 0.69)	(1, 1, 1)	(1.44, 2.47, 3.27)
	(0.27, 0.34, 0.48)	(0.31, 0.41, 0.69)	(0.31, 0.41, 0.69)	(1, 1, 1)

Tablo 3'te her bir kriterin bulanık geometrik ortalama değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4'de bulanık geometrik ortalama değerlere yer verilmiştir.

**Tablo 4.** İkili Karşılaştırma Matrisi

CRI	ri		
Dokümantasyon	3,79	5,32	6,33
Zaman Yönetimi	1,30	1,69	1,98
Geri Bildirim ve Değişime Açıklık	0,88	1,37	1,59
Ekip çalışması ve iş birliği	0,89	1,36	1,81
Proje eleman kapasitesi	0,52	0,73	1,13
Kaynak kullanımı	0,46	0,62	0,92
Risk Analizi	0,41	0,53	0,87
Anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik	0,28	0,36	0,63
Total	8,53	11,98	15,26
P (-1)	0,12	0,08	0,07
INCR	0,07	0,08	0,12

**3. Adım:** Tablo 5'te her bir kriterin bulanık ağırlıkları hesaplanmıştır.

**Tablo 5.** Bulanık Ağırlıklar

CRI	Wi		
Dokümantasyon	0,25	0,44	0,74
Zaman Yönetimi	0,09	0,14	0,23
Geri Bildirim ve Değişime Açıklık	0,06	0,11	0,19
Ekip çalışması ve iş birliği	0,06	0,11	0,21
Proje eleman kapasitesi	0,03	0,06	0,13
Kaynak kullanımı	0,03	0,05	0,11
Risk Analizi	0,03	0,04	0,10
Anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik	0,02	0,03	0,07

**4. Adım:** Tablo 6'da her bir kriterin ortalama ağırlık kriteri (Mi) ve bu değeri 0 ile 1 arasındaki ölçeğe yerleştiren normalleştirilmiş ağırlık kriteri (Ni) hesaplanmıştır. Elde edilen bulgulara göre, dokümantasyon zorunluluğu en önemli kriter olarak birinci sırada yer alırken, zaman yönetimi, ekip çalışması ve iş birliği, geri bildirim ve değişime açıklık, proje eleman kapasitesi, kaynak kullanımı, risk analizi izlenmektedir. Anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik ise, en az öneme sahip kriter olarak ortaya çıkmıştır.

**Tablo 6.** Ortalama ağırlık kriteri (Mi) ve Normalleştirilmiş ağırlık kriteri (Ni)

Kriterler	Mi	Ni	Sıralama
Dokümantasyon zorunluluğu	0,48	0,43	1
Zaman Yönetimi	0,15	0,14	2
Geri Bildirim ve Değişime Açıklık	0,12	0,11	4
Ekip çalışması ve iş birliği	0,13	0,11	3
Proje eleman kapasitesi	0,08	0,07	5
Kaynak kullanımı	0,06	0,06	6
Risk Analizi	0,06	0,05	7
Anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik	0,04	0,04	8

#### 4.2. Bulanık MAIRCA Yöntemiyle Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Çalışmada, proje yönetim metodolojisi arasından en iyi olan alternatif Bulanık MAIRCA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bulanık MAIRCA yöntemi uygulama adımları şu şekildedir:

**1. Adım:** Firma tarafından değerlendirilmesi istenen 4 proje yönetim sistemi Tablo 8’de verilen dilsel değerlendirme ölçeğine göre üç karar verici tarafından değerlendirilmiş ve karar matrisi oluşturulmuştur. Dilsel değerlendirmelere karşılık gelen sayısal değerler ile Tablo 9’da karar matrisi oluşturulmuştur.

**Tablo 7.** Kriter Tanımlama

Dökümantasyon zorunluluğu	K1
Zaman Yönetimi	K2
Geri Bildirim ve Değişime Açıklık	K3
Ekip çalışması ve iş birliği	K4
Proje eleman kapasitesi	K5
Kaynak kullanımı	K6
Risk Analizi	K7
Anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik	K8

**Tablo 8.**Dilsel Değişken Ölçeği((Boral vd. 2019,))

Dilsel Terim	Bulanık Sayı Karşılık
Çok Zayıf (VP)	(0,1,2)
Zayıf(P)	(1,2,3)
Ortalama Zayıf (MP)	(2,3,5,5)
Eşit (F)	(4,5,6)
Ortalama İyi (MG)	(5,6,5,8)
İyi (G)	(7,8,9)
Çok İyi (VG)	(8,9,10)

**Tablo 9.** Karar verici kişiler için dilsel değerlendirme

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
XP	G	VG	G	G	G	G	VG	G
Waterfall	P	MG	MP	P	F	P	MP	P
Scrum	VG	VG	VG	G	G	VG	G	VG
Kanban	G	G	VG	G	G	G	VG	VG

**Adım 2:** Dilsel değişkenlere karşılık gelen bulanık sayılar ile şirketlerin bulanık sayılara göre bulanık karar matrisi Tablo 10’da verilmiştir.

**Tablo 10.** Başlangıç Bulanık Karar Matrisi

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
XP	(7,8,9)	(8,9,10)	(7,8,9)	(7,8,9)	(7,8,9)	(7,8,9)	(8,9,10)	(7,8,9)
Waterfall	(1,2,3)	(5,6,5,8)	(2,3,5,5)	(1,2,3)	(4,5,6)	(1,2,3)	(2,3,5,5)	(1,2,3)
Scrum	(8,9,10)	(8,9,10)	(8,9,10)	(7,8,9)	(7,8,9)	(8,9,10)	(7,8,9)	(8,9,10)
Kanban	(7,8,9)	(8,9,10)	(8,9,10)	(7,8,9)	(7,8,9)	(7,8,9)	(8,9,10)	(8,9,10)

**Adım 3:** Proje yönetim metodolojisi tercihleri Eşitlik 13 ile belirlenir. Dört metodoloji olduğundan  $P_{Ai} = 0.25$  olarak kabul edilir.

**Adım 4-5:** Eşitlik 14 ile Tablo 11’deki bulanık teorik hesaplama matrisi elde edilir. Eşitlik 15 ile normalize karar matrisi Tablo 12’de verilmiştir.

**Tablo 11.** Bulanık Teorik Hesaplama Matrisi

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4
XP	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Waterfall	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Scrum	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Kanban	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
	K5	K6	K7	K8
XP	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Waterfall	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Scrum	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)
Kanban	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)	(0.025, 0.025, 0.025)

Tablo 12. Bulanık normalize karar matrisi

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4
XP	(0.275,0.315,0.354)	(0.274,0.308,0.343)	(0.260,0.297,0.334)	(0.287,0.328,0.369)
Waterfall	(0.039,0.079,0.118)	(0.171,0.223,0.274)	(0.074,0.130,0.186)	(0.041,0.082,0.123)
Scrum	(0.315,0.354,0.393)	(0.274,0.308,0.343)	(0.297,0.334,0.371)	(0.287,0.328,0.369)
Kanban	(0.275,0.315,0.354)	(0.24,0.308,0.343)	(0.297,0.334,0.371)	(0.287,0.328,0.369)
	K5	K6	K7	K8
XP	(0.273,0.312,0.351)	(0.275,0.315,0.354)	(0.297,0.334,0.371)	(0.265,0.303,0.341)
Waterfall	(0.156,0.195,0.234)	(0.039,0.079,0.118)	(0.074,0.130,0.186)	(0.038,0.076,0.114)
Scrum	(0.273,0.312,0.351)	(0.315,0.354,0.393)	(0.260,0.297,0.334)	(0.303,0.341,0.379)
Kanban	(0.273,0.312,0.351)	(0.275,0.315,0.354)	(0.297,0.334,0.371)	(0.303,0.341,0.379)

**Adım 6-7:** Eşitlik 16 ile Tablo 13'teki bulanık gerçek düşünme matrisi elde edilir. Son adımda ise, Eşitlik 17 ve Eşitlik 18 ile kriter fonksiyonlarının son değerleri ve sıralamalar Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 13. Bulanık Gerçek Düşünme Matrisi

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4
XP	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.006,0.007,0.008)	(0.007,0.008,0.009)
Waterfall	(0.001,0.002,0.003)	(0.004,0.006,0.007)	(0.002,0.003,0.005)	(0.001,0.002,0.003)
Scrum	(0.008,0.009,0.010)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)
Kanban	(0.007,0.008,0.009)	(0.006,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)
	K5	K6	K7	K8
XP	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)
Waterfall	(0.004,0.005,0.006)	(0.001,0.002,0.003)	(0.002,0.003,0.005)	(0.001,0.002,0.003)
Scrum	(0.007,0.008,0.009)	(0.008,0.009,0.010)	(0.006,0.007,0.008)	(0.008,0.009,0.009)
Kanban	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.007,0.008,0.009)	(0.008,0.009,0.009)

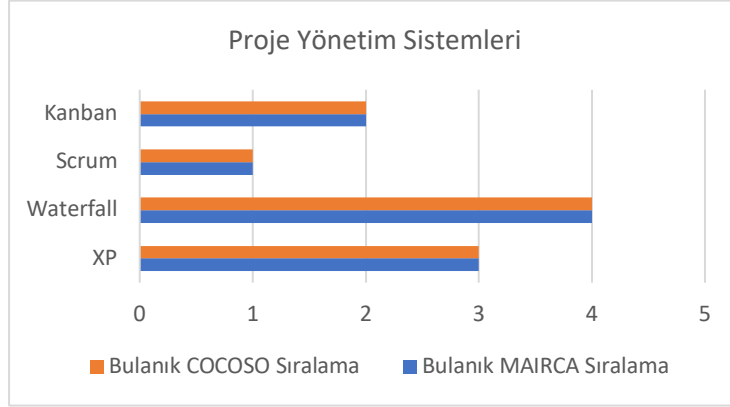
Tablo 14. Bulanık Marca Yöntemine göre Değerlendirme

Proje Yönetim Sistemleri	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Kriter Fonksiyon değeri(Qi)	Sıralama
XP	0.017	0.017	0.018	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.1374	3
Waterfall	0.023	0.019	0.022	0.023	0.020	0.023	0.022	0.023	0.1754	4
Scrum	0.016	0.017	0.017	0.017	0.017	0.016	0.018	0.017	0.1345	1
Kanban	0.017	0.018	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.1358	2

Elde edilen sonuçlara göre, Scrum dijital dönüşümde şirket için önerilen en iyi proje yönetim sistemi iken, Waterfall en son sıralamada yer almaktadır. Scrum (Qi) değeri, Kanban ve XP ile karşılaştırıldığında birbirlerine çok yakın değerler almıştır.

### 4.3.Duyarlılık Analizi

Duyarlılık analizi, değişen verilerin optimal kararlar üzerindeki etkilerini inceleyen bir yöntemdir (Eroğlu ve Atasoy, 2006). Bu analiz, modelin nasıl çalıştığına dair bir anlayış geliştirmenin yanı sıra, veri toplama süreci başlamadan önce modelin doğruluğunu test etmek için tercih edilir (Borgonovo, 2017). Özetle, duyarlılık analizi, kriter ağırlıklarındaki potansiyel değişiklikleri ve alternatiflerin bu değişikliklere nasıl tepki verdiğini ortaya koymak için kullanılır. Şekil 2’de görüldüğü gibi, iki farklı senaryo dikkate alınarak duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve alternatiflerin sıralamaları karşılaştırılmıştır. Sıralamalarda herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir.



Şekil 2. Farklı yöntemler ile elde edilen sıralamalar

### 5. Tartışma ve Sonuç

Dijital dönüşüm, bir kuruluşun temelden çalışma şeklini, müşterilerine değer sunma ve hedeflerine ulaşma şeklini değiştirmek için dijital teknolojileri kullanma sürecidir. Dijital dönüşüm ile süreçler iyileştirilebilir, verimlilik artırılabilir. Bu dönüşüm sürecinde, kuruluşun kültüründe, zihniyetinde ve çalışma modelinde de değişiklik yapılması gerekmektedir. Dijital dönüşümün nihai amacı, büyümeyi ve rekabet gücünü artıracak yeni iş modelleri, gelir akışları ve müşteri deneyimleri yaratmaktır. Teknoloji alanındaki bu gelişmeler, klasik proje yönetimleri yerine günümüz ihtiyaçları ve prensipleri üzerine özelleştirilmiş yeni proje yönetim sistemleri ortaya çıkarmıştır. Gereksinimleri karşılayan, optimum bütçe ve zaman kullanımı sağlayan işler ancak iyi bir proje yönetim sistemi seçerek sağlanabilmektedir. İşletmenin orta ve uzun vadedeki hedeflerine ulaşabilmesinde, tasarlanan projelerin başarıya ulaşabilmesi için proje yönetiminden etkin bir şekilde faydalanılmalıdır. Proje yönetimi, projelerin hedeflerine ulaşması için proje faaliyetlerinin planlanması ve kontrol edilmesinde yardımcı olmaktadır. Proje yönetimi amaç, zaman maliyet, ve kalite gibi unsurları göz önünde bulundurarak, proje ömrü boyunca insan, malzeme gibi kaynakların optimum seviyede kullanılmasına katkı sağlar. Her proje yönetim sürecinin kendine özgü öncelikleri olabilmektedir. Bu yüzden, proje yönetim sürecinin başarıyla sürdürülebilmesi için uygun sistemin seçilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, dokümantasyon zorunluluğu, zaman yönetimi, geri bildirim ve değişikliğe açıklık, ekip çalışması ve iş birliği, proje elemanı kapasitesi, kaynak kullanımı, risk analizi ve anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik, güvenilirlik olmak üzere 8 kriter ve şirket isteği doğrultusunda 4 proje yönetim sistemi belirlenmiştir. Bu sistemler, Waterfall ve sektörde yaygın olarak kullanılan Agile proje yaklaşımına bağlı proje yönetim sistemlerinden Scrum, Kanban, XP olarak belirlenmiştir. Çalışmada önerilen metodoloji, bütünleşik bulanık AHP ve bulanık MAIRCA yöntemleridir. Bulanık AHP yöntemi ile kriterlerin önem ağırlıkları, bulanık MAIRCA ile en iyi alternatifin seçimi yapılmıştır. Bulanık AHP yöntemi yazında sıkça tercih edilmesine karşın bulanık MAIRCA örnekleri kısıtlıdır. Bu çalışma ile de yazına katkı sağlayacağı umulmaktadır. Bulanık AHP yönteminde dokümantasyon zorunluluğu, en önemli kriter olarak görülürken, anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik diğer kriterlere göre en az öneme sahip kriter olarak bulunmuştur. İşletmelerin doğru dokümantasyon sistemleri ile, zaman ve mali kayıpların önüne geçmesi beklenmektedir. Ayrıca, işletmenin üretkenliği, iş birliği ve uyum artırılabilir, dokümanlar güvence altına alınabilir en önemlisi de geriye dönüşler ile süreçler büyük ölçüde hızlandırılabilir. Elde edilen sonuçlara göre, dokümantasyon zorunluluğu en önemli faktör olarak ortaya çıkmıştır. Dokümantasyon, kelime olarak belgelendirme anlamına gelir. Bir konuyu veya projeyi belgelere dayandırarak gelecek kuşaklara, kişilere aktarımını sağlamak olarak ifade edilebilir. Para, zaman israfına sebebiyet vermemek için dokümantasyon sisteminin önemi açıkça görülmektedir. Sistemle birlikte hem bilgi kayıt altına alınır hem de gelecek dönemde çalışacak ekip arkadaşlarına yardımcı olunabilir. Ayrıca, dokümantasyon sistemlerinin basit, açıklayıcı ve anlaşılır



olmasına özen gösterilmelidir. Bulanık MAIRCA yönteminde ise en önemliden en az önemliye göre sıralama yapıldığında, firmanın proje yönetim sürecine en uygun cevap verebilecek Scrum, Kanban, XP ve Waterfall sıralaması olarak elde edilmiştir. Scrum metodolojisinde kriterler karşılaştırıldığında, dokümantasyon zorunluluğu, zaman yönetimi, geri bildirim ve değişime açıklık, kaynak kullanımı, anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik ve güvenilirlik kriterlerinin aynı öneme sahip olduğu diğer üç kriter olan ekip çalışması ve iş birliği, proje eleman kapasitesi, risk analizi faktörleri ile arasında önem açısından az fark bulunduğu görülmektedir.

Müşteri beklentilerine hızlı geri dönüş, değişim sürecine hızlı adaptasyon, , kısa sürede markete çıkma, test süreçlerini daha hızlı bir şekilde gerçekleştirme, uygulamanın sürekli çalışır olması, birimler arası etkileşim, gibi avantajlarından dolayı Scrum Metodunun tercih edilmesi önerilmektedir. Ancak projeye başlamadan önce Scrum sürecinin tüm ekip tarafından benimsenmesi ve iş birliği içinde hareket edilmesi, süreci etkin yönetebilecek nitelikli proje elemanı temini ve karşılaşılabilecek risklere yönelik önlemler alınması büyük önem arz etmektedir. Scrum, Kanban, XP proje sistemleri kendi aralarında karşılaştırıldığında ise, aralarında çok az bir fark görülmektedir. Bunun sebebi, bu sistemlerin tümü Agile proje yaklaşımına bağlıdır. Agile yaklaşımı temelinde, müşteri odaklılık, hızlı yineleme iş birliği gibi birçok prensip ortaktır. Dijital dönüşüm sürecinde, Scrum ve Kanban gibi çevik metodolojiler iş akışını yönetebilir, görevleri önceliklendirebilir ve dijital dönüşüm girişimi boyunca ilerlemeyi izleyebilir. Özetle, yazılım sektöründe dijital dönüşüm sürecinde proje yönetim sistemi seçiminde Agile yaklaşımının benimsenmesi ile fırsatlar daha iyi yönetebilir, müşterilere değer sunma yeteneklerini geliştirebilir, esnek yapı ile pazardaki yeni teknolojilere uyum arttırılabilir, birimler arası işbirliği geliştirilebilir, sürekli iyileştirmeyi teşvik ederek verimlilik arttırılabilir.

Gelecek dönemdeki çalışmalarda, önerilen model kapsamı genişletilerek, sektördeki birden fazla firma görüşü alınarak model güvenilirliği sağlanabilir. Yapılan çalışma ve incelemeler sonucunda, her ne kadar söz konusu projede Scrum proje yönetim sistemi metodolojisinin seçilmesine karar verilmişse de, her proje için ilgili yöntemlerin tekrardan yapılması gerektiği unutulmamalıdır. Her projenin gereksinimleri, bulunulan koşullar, çalışan profili vb. farklılık göstermekte, bu da doğrudan metodoloji seçimini etkilemektedir. Proje yöneticileri ihtiyaçları ve proje kapsamı ile ilgili analizleri değerlendirmeli ve en uygun proje yönetim metodolojisini seçmelidir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Emine Elif Nebati problemin tanımlanması, literatür taraması, makale yazımı, analizlerin gerçekleştirilmesi ve yorumlanmasında, metnin gözden geçirilmesi ve revizyonların gerçekleştirilmesi konularında katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Akar, G. S. ve Çakır, E. (2016). Lojistik Sektöründe Bütünleştirilmiş Bulanık AHP-MOORA Yaklaşımı ile Personel Seçimi. *Journal of Management and Economics Research*, 14(2),185-199. <https://dergipark.org.tr/en/pub/yead/issue/21832/234733>

Alma, B., Coşkun, E. ve Uğur, N.G. (2016). Comparison of Traditional Project Management Techniques and Critical Chain Project Management for Management Of Information Technology and Information System Projects. *Yönetim Bilişim Sistemleri Dergisi*, 2(2), 202-212. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ybs/issue/27323/287652>.

Ayadi, H., Hamani, N., Kermad, L. ve Benaissa, M. (2021). Novel Fuzzy Composite Indicators for Locating a Logistics Platform Under Sustainability Perspectives. *Sustainability*, 13(7), 3891. <https://doi.org/10.3390/su13073891>.

Aydiner, A. S., Esen, M. F. ve Özlü, E. (2020). Türkiye’de Çevik Yazılım Geliştirme Süreçlerinde Scrum Yöntemini Uygulayan İşletmelerin Başarı Faktörleri. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*. 13(4), 463-477. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.598346>.

Bali, Ö. ve Gencer, C. (2005). "AHP, Bulanık AHP ve Bulanık Mantıkla Kara Harp Okuluna Öğretim Elemanı Seçimi." *Journal of Defense Sciences*, 4(1), 24-43. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/khosbd/issue/19238/204413>.

Başak, D. (2020). IT Yazılım Sektöründe Agile Scrum Proje Yönetimi Uygulaması. Uluslararası Bir Proje Örneği. Yüksek lisans tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul. [https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/592226/yokAcikBilim\\_10323301.pdf?sequence=-1](https://acikbilim.yok.gov.tr/bitstream/handle/20.500.12812/592226/yokAcikBilim_10323301.pdf?sequence=-1).

Borandağ, E. ve Yücalar, F. (2020). Artırılmış Gerçeklik ile Scrum Task Board Uygulaması. *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.33461/uybisbbd.652366>.

Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K. ve Naikan, V.N.A. (2020). An İntegrated Approach for Fuzzy Failure Modes and Effects Analysis Using Fuzzy AHP and Fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 108, 104195. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104195>.

Chang, D. Y. (1996). Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95, 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2).

Coşkun, O. ve Ekmekçi, İ. (2012). Bir inşaat Projesinin Evreleri ile Zaman ve Maliyet Analizinin Proje Yönetim Teknikleri Vasıtasıyla İncelenmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(20), 39-53. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfd/issue/21360/229122>.

Çalık, A. (2021). Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Yeşil Tedarik Zincirindeki Risklerin Karşılaştırılması. *Journal of Turkish Operations Management*, 5(2), 822-838. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1635196>.

Çalışkan, D., Yavuz, A., Doğan, B. ve Çalış, B. (2021). Türkiye'de Çevik ve Klasik Yazılım Geliştirme Metodolojilerine Dair Kapsamlı Bir Değerlendirme. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 149-159. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.688978>.

Çubukcu, A. (2020). Use of Agile and Open Innovation Approaches In Executing The Projects: A Field Study On Project Managers. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 692-702. <https://doi.org/10.21923/jesd.706449>.

Elibol, M. ve Erol, Ç.S. (2017). Scrum metodu Kullanılarak Bir Mobil Uygulama Geliştirme Sürecinin Gerçekleştirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(2), 169-176. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.309299>.

Erdem, O. A. ve Younis, A. (2014). Yazılım Projelerinin Geliştirme Sürecinde Yönetim. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 7(1), 1-9. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazibtd/issue/6630/87998>.

Eren, T., Hamurcu, M. ve Dinç, S. (2018). Kentsel Ulaşım İçin Alternatif Tramvay Araçlarının Çok Kriterli Seçimi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(2), 124-135. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gmbd/issue/38877/428117>.

Eren N.L (2022). Proje Yönetiminde Dijital Dönüşüm Süreçleri İçin Bir Bulanık ÇKKV Modeli Önerisi. (Yüksek lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi, Ankara. <https://avesis.hacettepe.edu.tr/yonetilen-tez/ad56bd71-0e15-4327-b92e-f7eb52163286/proje-yonetiminde-dijital-donusum-surecleri-icin-bir-bulanik-ckkv-modeli-onerisi>

Gencer, C. ve Kayacan, A. (2017). Yazılım Proje Yönetimi: Şelale Modeli ve Çevik Yöntemlerin Karşılaştırılması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 10(3), 335-352. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.331054>.

Gul, M., Mete, S., Serin, F. ve Celik, E. (2021). Fine-Kinney-Based Fuzzy Multi-Criteria Occupational Risk Assessment. Cham, Switzerland: Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-52148-6>

Gul, M. ve Ak, M. F. (2020). Assessment of occupational Risks From Human Health And Environmental Perspectives: A New Integrated Approach and Its Application Using Fuzzy BWM and Fuzzy MAIRCA. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(8), 1231-1262. <http://hdl.handle.net/20.500.12566/880>.

Ismail, M. F. B. ve Mansor, Z. (2018). Agile Project Management: Review, Challenges And Open Issues. *Advanced Science Letters*, 24(7), 5216-5219. <https://doi.org/10.1166/asl.2018.11705>.

Kaçtıoğlu, S., Keskinçilic, M. ve Kahveci, F. (2019). Yazılım Kalitesi Faktörü Olarak Yazılım Güvenliğinin Öğrenci Bilgi Sisteminde RIPS ile Testi ve ARAS ile Değerlendirilmesi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 33(4), 1261-1278. <https://dergipark.org.tr/pub/atauniiibd/issue/49762/595161>.

Kadenic, M. D., Koumaditis, K. ve Junker-Jensen, L. (2023). Mastering Scrum with a Focus on Team Maturity and Key Components of Scrum. *Information and Software Technology*, 153, 107079. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107079>.

Kahraman, C., Cebeci, U. ve Ruan, D. (2004). Multi-Attribute Comparison of Catering Service Companies Using Fuzzy AHP: The Case of Turkey. *International Journal Of Production Economics*, 87(2), 171-184. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00099-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00099-9).

Karakış, E. (2019). Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS ile Bütünleşik Karar Destek Modeli Önerisi: Özel Okullarda Öğretmen Seçimi. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (53), 112-137. <https://doi.org/10.18070/erciyesiibd.414655>.

Marnada, P., Raharjo, T., Hardian, B. ve Prasetyo, A. (2022). Agile Project Management Challenge in Handling Scope and Change: A Systematic Literature Review. *Procedia Computer Science*, 197, 290-300. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.143>.

Majumdar, A., Sinha, S. K., Shaw, M., & Mathiyazhagan, K. (2020). Analysing the vulnerability of green clothing supply chains in South and Southeast Asia using fuzzy analytic hierarchy process. *International Journal of Production Research*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1708988>.

Ömürbek, N., Makas, Y. ve Ömürbek, V. (2015). AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Kurumsal Proje Yönetim Yazılımı Seçimi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (21), 59-83. <https://dergipark.org.tr/en/pub/sbe/issue/23146/247242>.

Özcan, B. ve Büçğün, R. (2021). Project Management Application in a Bluetooth Product Firm. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 5 (2), 165-179. <https://doi.org/10.53600/ajesa.747192>.

Sanchez, F., Monticolo, D., Bonjour, E. ve Micaelli, J. P. (2018). Use of Bayesian Network Characteristics to Link Project Management Maturity and Risk of Project Overcost. *International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*, (420-426). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.09828>

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2017). The Scrum Guide™. Scrum.Org. <https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2017/2017-Scrum-Guide-US.pdf>

Şahin, Ö., & Ayvaz, B. (2020). Otomotiv sanayiinde tedarikçi performans değerlendirmesi için bir model önerisi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(37), 81-100. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1274387>

Seçme, N. Y. ve Özdemir, A. İ. (2008). Bulanık Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile Çok Kriterli Stratejik Tedarikçi Seçimi: Türkiye örneği. *İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 22(2), 175-191. <https://dergipark.org.tr/pub/atauniiibd/issue/2694/35467>.

Peker, T.M. (2022). İş süreçlerinin dijital dönüşümünde proje seçimi ve önceliklendirmesi için bir model önerisi. (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=qn5bHTboF0XuwATSvA3t6Q&no=uFWtqTLCH49-nFsQGvjfg>

- Tayyar, N. (2012). Pet Şişe Tedarikçisi Seçiminde Bulanık AHP ve Bulanık TOPSIS Yaklaşımı. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(3),351-371. <https://dergipark.org.tr/pub/sduiibfd/issue/20820/222830>.
- Tiryaki, A. M. (2021). Yaygın Kullanılan Çevik Yöntemlerin Küçük Ölçekli Bir Uygulamanın Geliştirilmesi Sürecinde Değerlendirilmesi Üzerine Bir Çalışma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 385-391. <https://doi.org/10.31590/ejosat.902178>.
- Wang, X., Chan, H. K., & Diaz-Rainey, I. (2012). A two-stage fuzzy-AHP model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(2), 595–606. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2011.03.021>.
- Wysocki, R. K. (2014). *Effective Project Management: Traditional, Agile, Extreme*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Effective+Project+Management:+Traditional,+Agile,+Extreme,+7th+Edition-p-9781118729168>
- Yücalar, F. ve Borandağ, E. (2019). Yazılım Projelerinde Kalitenin Arttırılması: TMMi. *AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture*, 3(2), 143-152. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ajesa/issue/52409/517250>.
- Yıldızbaşı, A. ve Çalık A. (2021). Üretim Sektöründeki KOBİ'lerin Teknoloji Olgunluk Düzeylerinin Bulanık MAIRCA Metodu ile Değerlendirilmesi. B. Erdebilli ve M. Kabak içinde, *Bulanık Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri: MS Excel ve Software Çözümlü Uygulamalar* (s. 442-453). Nobel Yayıncılık. <https://www.nobelyayin.com/bulanik-cok-kriterli-karar-verme-yontemleri-ms-excel-ve-software-cozumlu-uygulamalar-17607.html>



# Journal of Turkish Operations Management

## Exploring the relationship between technical and comfort factors in designing efficient buildings: a statistical analysis of a real-world dataset

Nastaran Deljavan<sup>1\*</sup>, Hajar Franoudkia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Architecture, KTO Karatay University, Konya, Turkey,

nastaran.deljavan@karatay.edu.tr ORCID No: <http://orcid.org/0009-0003-0985-9727>

<sup>2</sup> Department of Business Administration, Baskent University, Ankara, Turkey,

Email: hajerfarnoudkia@baskent.edu.tr ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9201-663X>

\*Sorumlu Yazar

### Article Info

#### Article History:

Received: 01.08.2023

Revised: 28.11.2023

Accepted: 14.02.2024

#### Keywords:

Facade Systems

Human Comfort

Efficient Buildings

Statistical methods

Reversible Jump Markov Chain Monte

Carlo Method

### Abstract

This study investigates the three factors that contribute to designing efficient buildings, namely technical solutions, facade systems, and occupant requirements, through the use of a real-world dataset consisting of 49 efficient buildings from various locations across the globe. Each factor comprises distinct elements that are essential in achieving building efficiency. Statistical methods, including correlation and Kruskal-Wallis methods, as well as advanced statistical methods such as the reversible jump Markov chain Monte Carlo method, were employed to estimate parameters that represent the conditional dependence between the elements of each factor. The undirected graphs were generated for each factor based on the conditional dependence between the elements of the factor which is shown by a link. Through the analysis of these graphs, designers can enhance their comprehension of the correlation between the various elements of each factor, which can ultimately result in improved building efficiency. This, in turn, may lead to a decrease in air pollution and energy consumption while enhancing human comfort.

### 1. Introduction

Lovell (2010) states that 76% of electricity generated is consumed by buildings for lighting, heating, cooling, and plug loads. The primary source of electricity generation is fossil fuels, which leads to numerous issues such as air and water pollution, the emission of toxic substances, and the release of greenhouse gases that contribute to global warming. Consequently, Alternative methods are being explored to construct buildings that are environmentally friendly and utilize renewable energy sources to decrease their carbon footprint. The function of building envelopes, which act as a barrier between a building's interior and exterior, is crucial in this context. Manioglu and Yilmaz (2006) argue that building envelopes have a significant impact on energy consumption for heating and cooling. A well-designed facade not only increases efficiency but also reduces energy consumption, while a poorly designed one leads to higher energy consumption. High-performance facades, in particular, decrease the thermal load and reduce energy consumption in buildings (Bessoudo, 2008). Knaack and Klein (2009) state that external walls have a secondary function of regulating energy transfer between the interior and exterior of buildings, while their primary function is to separate interior spaces from exterior spaces. According to Brock (2005), high-performance facades must be able to control air leakage, resist water penetration, resist wind load, and be weather-tight. The key considerations in designing building facades include capturing solar energy while preventing heat transfer during the winter, preventing heat gain during the summer, blocking outside noise, and providing natural ventilation and daylight.

Architects and engineers are exploring the integration of various techniques on building facades to generate energy using renewable sources, as the large facade area in most buildings provides an opportunity for this. This optimization of energy consumption involves not only new mechanical techniques but also the use of renewable

energy through building facades instead of relying on fossil fuels. To this end, different systems and techniques are under investigation to utilize renewable energy for lighting, heating, and cooling systems, with a focus on their application on building facades. These systems can be active or passive; passive systems directly apply renewable energies like solar energy for heating and cooling via building facades without the use of mechanical systems, while active systems utilize mechanical systems to convert renewable energy into thermal or electrical energy.

Aksamija (2013) and Moghtadernejad (2013) note that the types of facades used in buildings are the most critical factor in improving human comfort and reducing energy consumption and environmental pollution. On the other hand, Tam, Le, and Wang (2018) believe that facade design is an important factor in achieving cost reduction in construction and maintenance while improving human comfort. Newsham, Brand, Donnelly, Veitch, Aries, and Charles (2009) believe that increasing indoor environmental quality results in enhancing resident satisfaction levels. Additionally, Lovell (2010) and Kubba (2010) state that human comfort in buildings depends on several parameters, natural ventilation, including indoor air quality, access to outside views, natural light levels, preventing glare, acoustics, preventing noise pollution, thermal comfort, building envelopes, facade systems, and finishing materials. They emphasize that these aspects should be taken into account during building design and construction. In addition, Lovell (2010) states that the building envelope accounts for approximately 35% of the building construction cost. Tam *et al.* (2018) believe that designing and constructing high-performance facades is more expensive than conventional building facades. However, high-performance facades have an impact on energy consumption, maintenance costs, indoor environmental quality, and human comfort levels. Muralikrishna and Manickam (2017) argue that human's non-responsible consumption of resources is responsible for environmental pollution, which cannot be processed or neutralized by the environment. They identify increasing energy consumption in buildings and industrial sectors, as well as population growth, as the most significant factors contributing to environmental pollution. Liu, Zhang, and Liu (2017) suggest two ways to address man-made pollution: preventing it from entering the environment and cleaning it if it does enter. In the construction sector, it is possible to prevent air pollution caused by fossil fuels by utilizing renewable energy for cooling and heating buildings through their facades. Moreover, building envelopes can help prevent heat loss or gain.

Designing building facades involves considering numerous factors that can be grouped into three categories: Occupant requirements, appropriate technical solutions, and efficient facade systems. Human comfort is a fundamental consideration in building design, and it has been sought after since the earliest human existence.

## 2. Application

The researchers studied several efficient buildings that were featured in publications and dissertations. Afterward, they randomly chose 49 (see Appendix A) of these buildings to analyze based on three factors; Technical Solutions (TS), Facade Systems (FS), and Occupant Requirements (OR). The analysis of a dataset consisting of 55 binary variables representing TS, FS, and OR for 49 efficient buildings. The aim of this analysis is to explore the relationship within and between these factors and to categorize the buildings based on their quality. To explore the relationship between them the correlation analysis is conducted and finally, to show it in a graphical way, Copula Gaussian Graphical Models (CGGM) is applied within each factor.

### 2.1. Descriptive Statistics

Our dataset consists 49 rows and 55 columns. The first 25 columns of the dataset represent technical solutions, the next 14 columns represent active and passive facade systems, and the last 16 columns represent occupant requirements. To show the relationship within and between each factor, we calculated the ratio of 1s for every factor of each of the 49 samples. Descriptive statistics for each factor are presented in .

Table 1.

**Table 1.** The descriptive statistics of three facade quality factors of buildings.

Factor	Size	Mean	StDev	Minimum	Median	Maximum
TS	49	0.222	0.099	0.040	0.200	0.640
FS	49	0.122	0.072	0.000	0.142	0.428
OR	49	0.445	0.152	0.062	0.500	0.687

It can be seen that the OR variable has the highest mean value among the three variables, followed by the TS and then the FS variable. The TS variable also has a higher maximum value compared to the other two variables. Additionally, the TS variable has a higher standard deviation than the other two variables, indicating that its values are more spread out. The following boxplot in Figure 1 represents the distribution of the three building quality factors.

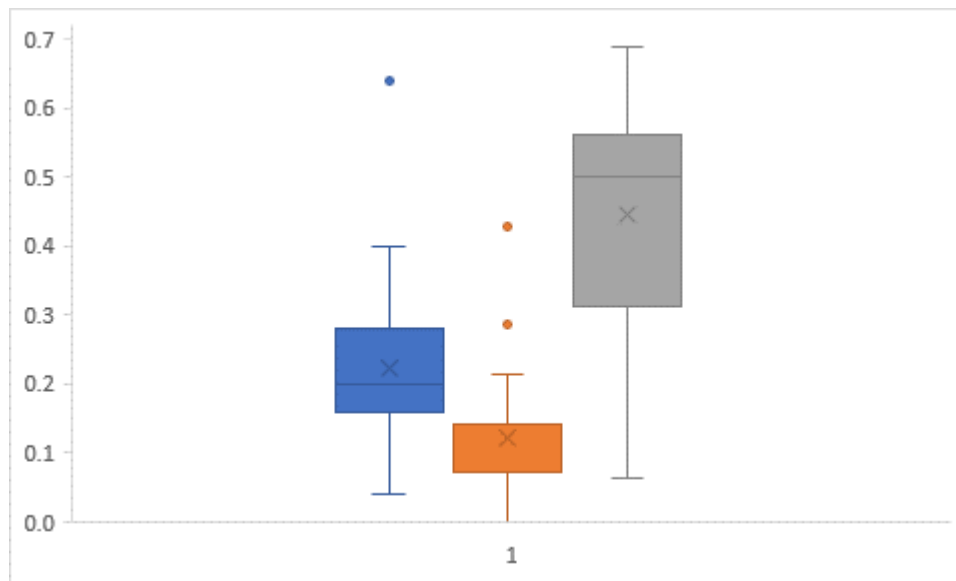


Figure 1. The boxplot of TS (Left), FS (Middle), and OR (Right).

### 2.2 Comparison of the Three Factors

As the variables are all ratios, to compare them we used the Kruskal-Wallis test, which is a non-parametric statistical test used to determine whether there are significant differences between two or more groups of independent samples. This test is appropriate when the assumption of the normal distribution is not met, as is the case with our data, as evidenced by the boxplots. The Kruskal-Wallis test tests the null hypothesis that the medians of the groups are equal against the alternative hypothesis that at least one group has a different median. The test statistic is calculated as the sum of ranks within groups, and its distribution under the null hypothesis is approximated by a chi-squared distribution with degrees of freedom equal to one less than the number of groups. Based on the results, it can be concluded that there is significant evidence to suggest that the central tendencies of the three variables are not equal.

Table 2. Kruskal Wallis test

Method	DF	H-Value	P-Value
Not adjusted for ties	2	86.71	0.000
Adjusted for ties	2	87.37	0.000

### 2.3 Correlation Analysis

The correlation coefficient measures the strength of the linear relationship between the two variables especially in dealing with variables that are ratios. In other words, it approves how well the two variables are related to each other in a straight line. That is why in the inference of the relationship between three factors, the Spearman correlation coefficient is used because the normality assumption does not hold with the data that can be seen in the matrices shown in Figure 2.

Based on the correlation coefficients provided, we can make the following inferences about the relationship between the three quality factors. The correlation coefficient between TS and FS is 0.639, which indicates a moderate positive correlation between these two factors. This suggests that buildings with high-quality TS are likely to have high-quality FS as well. The correlation coefficient between TS and OR is 0.578, which indicates a moderate positive correlation between these two factors. This suggests that buildings with high-quality TS are likely to have high-quality OR as well. The correlation coefficient between FS and OR is 0.408, which indicates a weak positive correlation between these two factors. This suggests that buildings with high-quality FS are somewhat likely to have high-quality OR as well, but the relationship is not as strong as that between TS and either of the other two factors. Overall, these correlation coefficients suggest that there are some relationships between the three quality factors, but they are not extremely strong. It may be useful to explore other factors that could be influencing the quality of buildings as well.



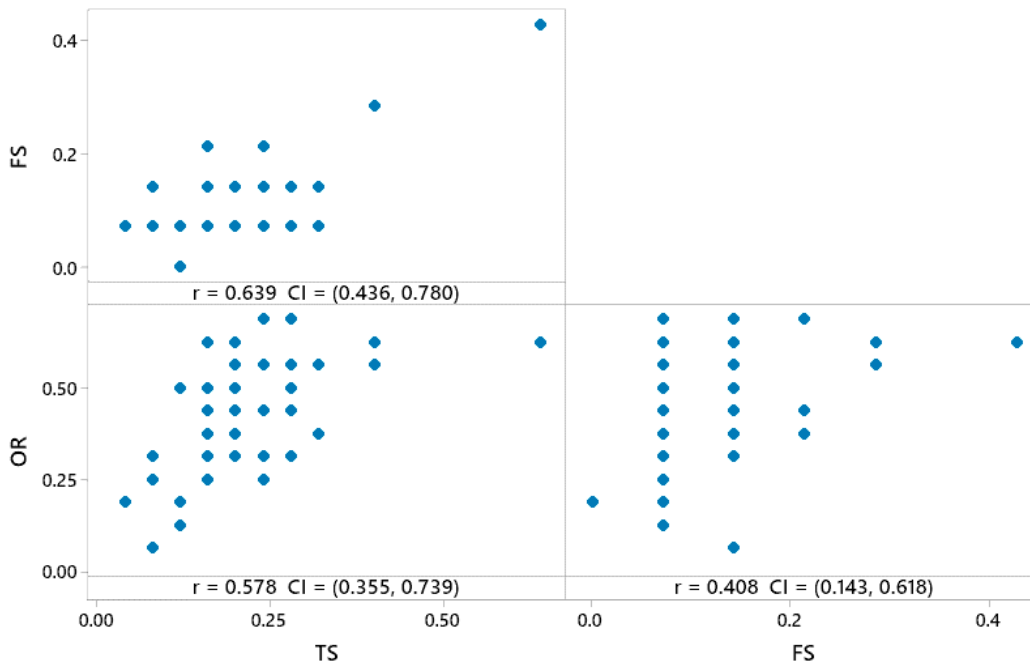


Figure 2. The matrix correlation plot of TS, FS and OR

### 2.4 Building Categorization

Finally, the three binary variables considered in our analysis were TS, FS, and OR. We constructed a joint contingency plot in Figure 3 to visualize the relationships between these variables and the resulting groupings of buildings. The plot shows the frequency of each combination of the three variables and the corresponding groupings of buildings. Four distinct groups of buildings are identified based on their combinations of variables. 11 buildings are in the first group consisting of zero values for all three factors meaning that their value of the three factors is all less than the mean. The second group consisted of 15 buildings with only one high value for any one of the three factors. The third group consisted of 12 buildings with two high values for any two of the three factors. Finally, the fourth group consisted of 11 buildings with high values for all three factors.

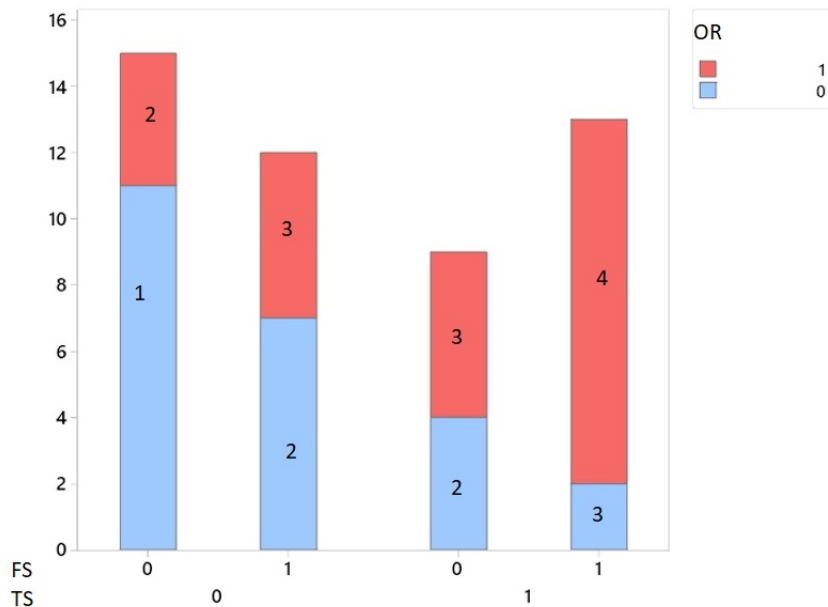


Figure 3. The joint distribution of TS, FS and OR levels (0 less than mean and 1 greater than mean)

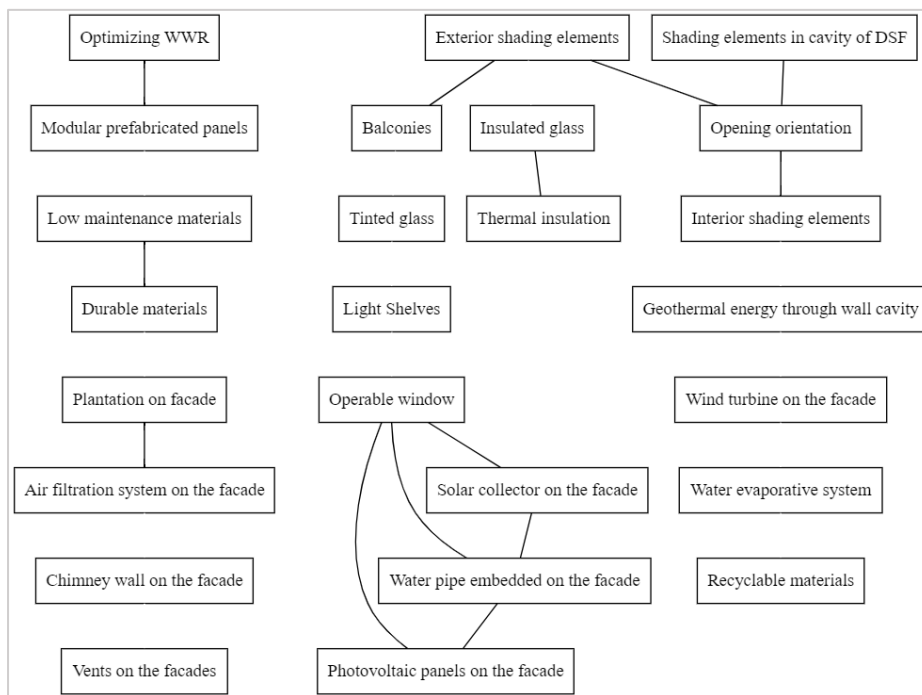
### 2.5 Copula Gaussian Graphical Models

A copula Gaussian graphical model is a statistical model that describes the dependence structure between random variables. It combines copula theory, which characterizes the dependence structure between variables, with



Gaussian graphical models, which represent the conditional independence relationships between variables using a graph. The copula function is used to model the dependence structure between variables, while the Gaussian graphical model is used to represent the conditional independence relationships between variables. This approach is particularly useful when dealing with high-dimensional datasets with complex dependence structures which is held in the data used in this study. To estimate the inverse of the covariance matrix to explore the conditional dependence between the different elements of each factor with the elements of the other factor, Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo Method (RJMCMC) is used. More information can be found in Farnoudkia and Purutculoglu (2019). In order to provide the graphical representation of the network, the *BDgraph* package in *R* is used. (Mohammadi and Wit, 2015)

The graphical model for TS is presented in Figure 4, depicting the interrelationship among 15 TS. A pivotal TS that can significantly enhance building efficiency is the opening orientation, which is linked to the exterior, interior, and in-cavity shading devices. This association is reasonable since shading devices are consistently designed based on the opening orientation to mitigate solar gain during summer days and increase solar gain during winter days. The correlation between plantation and air filtration system on the facade indicates that the implementation of plants on building facades not only mitigates air pollution but also diminishes ambient temperature. Moreover, the relationship between insulated glass and thermal insulation demonstrates that the employment of these two TS can effectively reduce energy consumption in buildings. As per the network depicted in Figure 4, employing durable and low maintenance materials can be advantageous in reducing the cost of building construction. Additionally, the use of modular prefabricated panels in facade construction can facilitate the optimization of the window-to-wall ratio (WWR). Balconies equipped with roofs on facades can function as shading elements, effectively preventing the ingress of solar radiation into interior spaces. It is imperative to take into account the placement of operable windows during the installation of photovoltaic panels, solar collectors, and water pipes embedded in facades, as failure to do so may result in a decrease in the percentage of operable windows, which can adversely affect natural ventilation in buildings.



**Figure 4.** Copula Gaussian graphical model showing the relationship within TS.

The graphical model illustrated in Figure 5 exhibits the correlation among FCs, which are categorized as active (denoted in red) and passive FCs. There are 8 links between 5 passive and 4 active FCs. The installation of movable shading devices on facades, which track the sun's position, prevent solar gain during summer and enhance natural ventilation by considering the direction of the prevailing wind. Building rotation and movable facades that follow the sun's radiation not only prevent or increase solar gain during summer and winter, but also improve natural ventilation by tracking wind directions. Photovoltaic panels and collectors can be installed in the cavity of double skin facades or can be utilized as fixed shading devices on facades, serving as a solar energy integrated facade. A self-shading facade is a type of fixed shading facade that covers the entire facade.

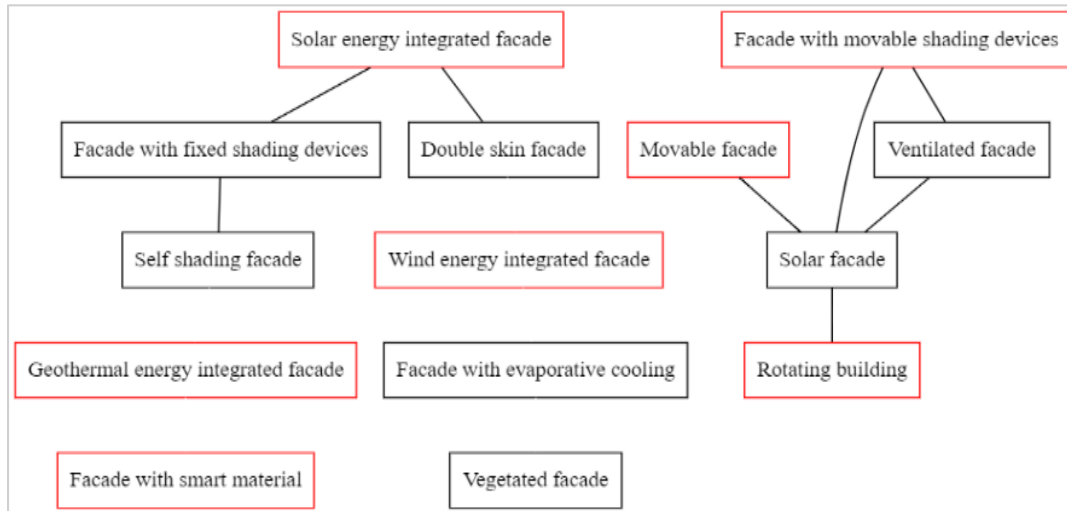


Figure 5. Copula Gaussian graphical model showing the relationship within FS.

The graphical model presented in Figure 6 displays the 14 links among ORs. To decrease air pollution by reducing energy consumption, it is recommended to utilize passive systems that do not require mechanical operation. Furthermore, the implementation of low emission materials can significantly enhance the air quality of interior spaces. The implementation of renewable energy sources not only reduces energy consumption and pollution but also enhances thermal comfort during both summer and winter. To improve thermal comfort in summer, it is recommended to enhance natural ventilation. However, the reduction of outside noise has an inverse relationship with natural ventilation during both day and night, as the use of operable windows for natural ventilation can lead to increased noise levels. The correlation between affordable systems and installation costs reveals that utilizing affordable systems for the construction of building facades can result in decreased installation costs. In order to have daylight and outside view, it is essential to prevent glare, which can significantly reduce visual comfort.

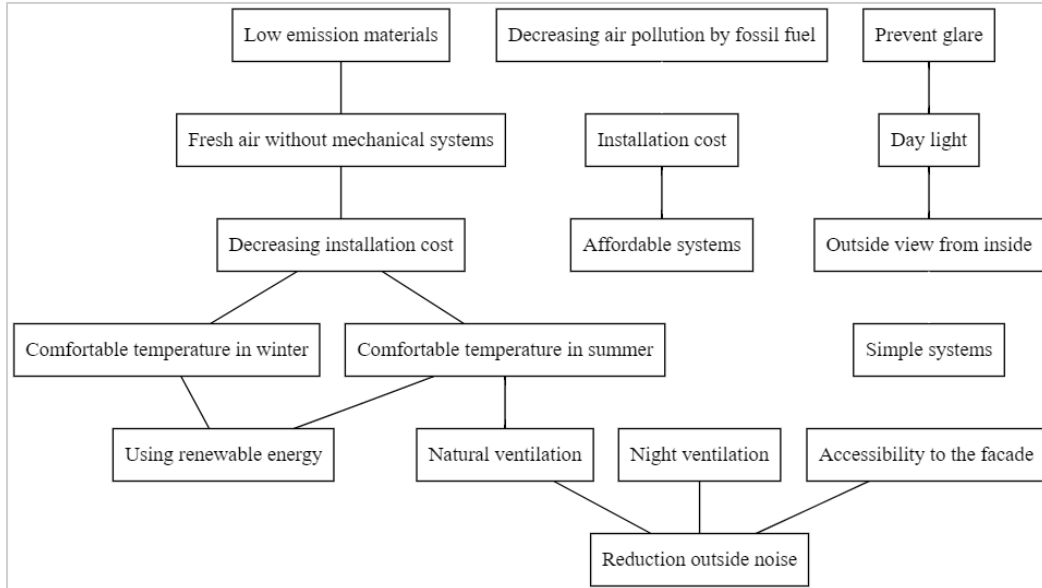


Figure 6. Copula Gaussian graphical model showing the relationship within OR.

### 3. Conclusion

This study aims to investigate a sample of efficient buildings in terms of three important technical and comfort factors named shortly by TS, FS, and OR. The descriptive statistics and the plot of these factors show that they are not symmetrically distributed and OR has the highest mean and median that is proved by Kruskal-Wallis test as well. In continue, it is approved that there is a significant positive correlation between these factors which show that they are linearly dependent to each other. This study has also categorized buildings into four groups based on their level of factors. The results show that most buildings have two high levels of factors, while over 20% of

buildings have no high levels or all high levels with the same percentage. This information provides valuable insights into the distribution of building efficiency across different types of buildings. Finally, some advanced statistical methods help us to provide a graph to represent the structure of the internal elements of each factor. The results of the analyzing these graphs suggest that employing durable and low maintenance materials, optimizing window-to-wall ratio, and utilizing passive systems by using solar energy are crucial in reducing building energy consumption while improving air quality and thermal comfort. The findings of this study can help inform future building designs to achieve greater efficiency and sustainability.

In addition, as a future study, we plan to investigate the high performance of buildings in more detail, exploring potential trade-offs between building efficiency and other design considerations such as aesthetics and comfort.

### Declaration of conflicting interests

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

### Funding

No financial support was received for this study.

### Contribution of authors

Contribution of authors The authors have equal contribution in all the writing, modeling.

### References

- Aksamija, A. (2013). *Sustainable Facades: Design Methods for High-Performance Building Envelopes*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New York, New Jersey.
- Bessoudo, M. (2008). *Building Facades and Thermal Comfort*. VDM Verlag Dr.Muller Ahtiengesellschaft & Co.KG, Saarbruchen, Germany.
- Brock, L. (2005). *Designing the External Wall: An Architectural Guide to the Vertical Envelope*. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Farnoudkia, H., & Purutcuoglu, V. (2019). Copula Gaussian graphical modeling of biological networks and Bayesian inference of model parameters. *Scientia Iranica*, 26(4), 2495-2505. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20667.1866>.
- Knaack, U., Klein, T., (2009). *The Future Envelope 2: Architecture - climate - Skin*. ISO Press under the imprint Delf University Press.
- Kubba, S. (2010). *LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook*. Retrieved February, 2012, Available at [http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpLEEDPCA5/viewerType:toc/root\\_slug:leed-practices-certification/url\\_slug:leed-practices-certification/](http://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpLEEDPCA5/viewerType:toc/root_slug:leed-practices-certification/url_slug:leed-practices-certification/)
- Liu, J., Zhang, L., and Liu, Z. (2017). *Environmental Pollution Control*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, Berlin, Germany.
- Lovell, J., (2010). *Building Envelopes an Integrated Approach*. Princeton Architectural Press. New York
- Manioglu, G. and Yılmaz, Z. (2006). Economic evaluation of the building envelope and operation period of heating system in terms of thermal comfort. *Energy and Buildings*, 38 (3), 266-272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.009>
- Moghtadernejad, S. (2013). *Design, Inspection, Maintenance, Life Cycle performance and integrity of Building Facades*. Master's thesis. McGill University.
- Mohammadi, A., & Wit, E. C. (2015). Bayesian structure learning in sparse Gaussian graphical models. <https://doi.org/10.1007/s11222-014-9523-7>
- Muralikrishna, I.V. and Manickam, V. (2017). *Environmental Management: Science and Engineering for Industry*. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK) and Waltham, Massachusetts, USA.
- Newsham, G., Brand, J., Donnelly, C., Veitch, J., Aries, M., and Charles, K. (2009). Linking indoor environment conditions to job satisfaction: a field study. *Building Research & Information*, 37(2), 129-147. <https://doi.org/10.1080/09613210802710298>

Tam, V.W.Y., Le, K.N., and Wang, J.Y. (2018). Cost Implication of Implementing External Facade Systems for Commercial Buildings. *Sustainability*, 10(6), 1917. <https://doi.org/10.3390/su10061917>

## Appendix A

	Buildings	Location	Climate Zone	Building Type	Area	Number of Stories	Architects
1	US Census Bureau Headquarters	Suitland, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Office Building	139,355 m <sup>2</sup>	8	SOM
2	Santa Monica Civic Center Parking Struct	California, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Parking Garage	27,758 m <sup>2</sup>	8	Moore Ruble Yudell Architects & Planners
3	Building Block Social Nestle Graneros	Graneros, O'Higgins, Chile	Semi-arid Climate, Bsk	Office Building	2,800 m <sup>2</sup>	3	GH+A / Guillermo Hevia
4	3M Italia S.P.A Headquarters	Pioltello, Milan, Italy	Humid Subtropical Climate, Cfa	Office Building	10,300 m <sup>2</sup>	5	Mario Cucinella
5	Burj Doha	Doha, Qatar	Hot Desert Climate, Bwh	Office Building	110,000 m <sup>2</sup>	49	Jean Nouvel
6	Hanwha Headquarter Remodelling	Seoul, South Korea	Humid Continental Climate, Dwa	Office Building	57,696 m <sup>2</sup>	30	UN Studio
7	King Fahad National Library	Riyadh, Kingdom of Saudi Arabia	Hot Desert Climate, Bwh	Library	-	5	Gerber Architekten
8	New Kuwait University Sabah AL-Salem	Shidadiyah, Kuwait	Hot Desert Climate, Bwh	Educational Building	59,458 m <sup>2</sup>	5	Perkins+Will
9	South Australian Health	Adelaide SA, Australia	Mediterranean Climate, Csa	Health and Medical Research	25,000 m <sup>2</sup>	10	Woods Bagot
10	Juvelen- a new landmark in Uppsala	Uppsala Resecentrum, Sweden	Humid Continental Climate, Dfb	Travel Center, Fitness Center, Restaurant	10,000 m <sup>2</sup>	6	Utopia Arkitekter
11	Habitat Items Leon	Leon, Mexico	Humid Subtropical Climate, Cwa	Educational Building	1,180 m <sup>2</sup>	2	SHINE Architecture & TA arquitectura
12	Rey Juan Carlos Hospital	Madrid, Spain	Mediterranean climate, Csa	Hospital	24,923.20 m <sup>2</sup>	9	Rafael De La-Hoz
13	John and Frances Angelos Law Center	Baltimore, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Educational Building	17,873 m <sup>2</sup>	12	Behnisch Architekten, Ayers Saint Gross
14	Soho Hailun Plaza	Shanghai, China	Humid Subtropical Climate, Cfa	Office Building	-	33	UN studio
15	Embassy of the United States	London, England	Oceanic Climate, Cfb	Embassy Building	-	12	Kieran Timberlake
16	Sony City Osaki	Tokyo, Japan	Humid Subtropical Climate, Cfa	Office Building	-	25	Nikken Sekkei
17	Hospital Manuel Gea Gonzales	Mexico City, Mexico	Subtropical Highland Climate, Cwb	Hospital	2,500 m <sup>2</sup>	5	Berlin-based Elegant Embellishments
18	Green Cast	Odawara-shi, Kanagawa prefecture, Japan	Humid Subtropical Climate, Cfa	Multipurpose building	1052 m <sup>2</sup>	5	Kengo Kuma & Associates
19	Yishun Community Hospital	Yishun, Singapore	Tropical Rainforest Climate, Af	Hospital	-	15	GENSLER
20	Unilever Haus	Hamburg, Germany	Oceanic Climate, Cfb	Office Building	37,997 m <sup>2</sup>	6	Behnisch Architekten
21	The Crystal and the Cloud	Copenhagen, Denmark	Oceanic Climate, Cfb	Office Building	6,850 m <sup>2</sup>	7	Schmidt Hammer Lassen Architects
22	Manitoba Hydro Place	Manitoba, Canada	Subarctic Climate, Dfc	Office Building		22	KPMB- Architects

23	Council House	Melbourne VIC, Australia	Oceanic Climate, Cfb	Office Building	12,526 m <sup>2</sup>	10	DesignInc
24	Surry Hills Library and Community Centre	New South Wales, Australia	Humid Subtropical Climate, Cfa	Library	898 m <sup>2</sup>	4	FJMT
25	KFW Westerkade	Frankfurt, Germany	Oceanic Climate, Cfb	Office Building	39,000 m <sup>2</sup>	14	Sauerbruch Hutton
26	Q1 Thyssen Krupp Quarter	Essen, Germany	Oceanic Climate, Cfb	Office Building	-	14	JSWD Architekten, Chaix & Morel et Associés
27	Rmit Design Hub	Melbourne, Australia	Oceanic Climate, Cfb	Educational Building	13,000 m <sup>2</sup>	9	Sean Godsell and Peddle Thorp Architects
28	Kiefer Technic Showroom	Austria	Humid Continental Climate, Dfb	Office Building	-	2	Ernst Giselbrecht +Partner
29	CJ Cheiljedang Research & Develop. center	Seul, Korea	Humid Continental Climate, Dwa	Office Building	-	15	Yazdani Studio
30	Mercella Niehoff School of Nursing	Chicago, USA	Humid Continental Climate, Dfa	School	5,574 m <sup>2</sup>	4	Solomon Cordwell Buenz
31	Al Bahar Towers	Abu Dhabi, UAE	Hot Desert Climate, Bwh	Office Building	-	29	Aedas Architects
32	Kinetower (Kinetura)	Belgium,Stakendijk	Temperate oceanic climate, Cfb	-	-	-	Barbara van Biervliet and Xaveer Claerhout
33	Abu Dhabi Central Market	Abu Dhabi - UAE	Hot Desert Climate, Bwh	Shop Center	689,416 m <sup>2</sup>	3	Foster + Partners
34	Richard J. Klarchek Information Commons	Chicago, USA	Humid Continental Climate, Dfa	Library	6,410 m <sup>2</sup>	4	Solomon Cordwell Buenz
35	POLA, Ginza	Tokyo, Japan	Humid Subtropical Climate, Cfa	Commercial Building	-	14	Yasuda Atelier, Nikken Sekkei
36	Vivian and Seymour Milstein Family Heart	New York, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Hospital	11,613 m <sup>2</sup>	8	Pei Cobb Freed & Partners
37	Gemini Haus	Weiz, Austria	Warm-summer humid continental climate, Dfb	Part of the Styria County Energy Exhibition	-	2	Roland Mösl
38	Sliding House by DRMM	Suffolk, England	Oceanic Climate, Cfb	House, Residential	200 m <sup>2</sup>	2	dRMM; Alex de Rijke, Joana Pestana Lages Goncalves
39	GucklHupf	Vienna, Austria	Oceanic Climate, Cfb	Recreation House	48 m <sup>2</sup>	2	Hans Peter Wörndl
40	M-vironments by Micheal Jantzen	Valencia, Spain	Cold semi-arid climate	Houses, Office facilities and Pavilions	-	1	Micheal Jantzen
41	Dynamic Tower, Rotating Tower	Dubai, UAE	Hot Desert Climate, Bwh	Offices, Hotel, Apartments, Villas	1200 m <sup>2</sup>	80	David Fisher
42	Wind Shaped Pavilion By Michael Jantzen	Frankfurt am Main, German	Oceanic Climate, Cfb	Public or Private Pavilion	-	6	Michael Jantzen
43	Heliotrop	German- Bavaria, German	Oceanic Climate, Cfb	Dental Laboratory	-	3	Rolf
44	Suite Vollard	Curitiba, Paraná, Brazil	Subtropical Highland Climate, Cwb	Residential	270 m <sup>2</sup>	2	Bruno de Franco
45	Rotating Dome Home	New York, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Hous	215 m <sup>2</sup>	2	Patric Marsili
46	Everingham Rotating House	Wingham, Australia	Humid Subtropical Climate, Cfa	Hous	-	2	Luke Everingham
47	Rotating Home by Johnstone	Southern California, USA	Humid Subtropical Climate, Cfa	Residential, House	475 m <sup>2</sup>	2	Al Johnstone
48	55° Dubai – Time Residences	Dubai, UAE	Hot Desert Climate, BWh	Holiday Apartments	-	30	Glenn Howell Architects
49	Rotating Ecohome – The Dumble Project	Snelston, England	Oceanic Climate, Cfb	Residential, House	930 m <sup>2</sup>	4	Robin Hamilton



# Journal of Turkish Operations Management

## Optimization of nanofiber diameter in the electrospinning of polyamide 6 by two-level factorial design

Deniz Efendioğlu<sup>1\*</sup>, Serife Akkoyun<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yildirim Beyazit University, 06010 Ankara, Türkiye

e-mail: [defendioğlu@aybu.edu.tr](mailto:defendioğlu@aybu.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3710-9187>

<sup>2</sup>Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Ankara Yildirim Beyazit University, 06010 Ankara, Türkiye

<sup>3</sup>Central Research Laboratory, Application and Research Center, Ankara Yildirim Beyazit University, 06010 Ankara, Türkiye  
e-mail: [serife.akkoyun@aybu.edu.tr](mailto:serife.akkoyun@aybu.edu.tr), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6676-6389>

\*Corresponding Author

### Article Info

#### Article History:

Received: 19.09.2023

Revised: 09.12.2023

Accepted: 29.01.2024

#### Keywords

Factorial Design,

Polyamide 6,

Optimization,

Nanofibers,

Electrospinning

### Abstract

The utilization of 2-level factorial design has been extensive in the literature to observe the relationship between parameters and responses. Among the subjects open for exploration, the process of nanofiber creation stands out as an intriguing avenue to explore the correlations that emerge between variables and outcomes. The primary objective of the study is to establish the relationship between the parameters of electrospinning of polyamide 6 (PA6) solutions to obtain desired nanofiber diameters by two level full factorial design. The investigation hones in on four critical parameters related to the electrospinning process of PA6 solutions. These parameters are solution concentration, applied voltage, distance between the spinneret and the collector, and the flow rate of the solution. Employing a two-level factorial design, these parameters are methodically manipulated at two distinct levels each to systematically unravel their individual and collective impacts on nanofiber diameter outcomes. After the model is obtained, the full model was fitted to first response. In the step of identifying important variables, background elimination and forward selection was chosen. Clearly polymer concentration have strong effect on the response and the effects of other main factors and interactions are explained in detail.

## 1. Introduction

The control of the electrospinning process ensures that the products are obtained as desired. From this point of view, it is aimed to make clear studies on fiber size and morphology by looking at various levels of parameters related to the electrospinning process and developing models. The fiber diameter achieved in electrospinning determines various properties of the electrospun fiber mats, including mechanical, electrical, and optical properties.

The process of determining which effects should be chosen for significant impact has been investigated in numerous studies. Thompson et. al. (2007) stated this by examining the effects of 13 materials and operating parameters on electrospun fiber diameters. The study of Naderi et al. (2008) has similarities with the previous study except that they used a response function and central composite design (CCD). He et al. (2020) conducted an examination of the impact of alternating current (AC) on the diameter and orientation of electrospun nanofibers using the Box-Behnken Methodology. In a related study, Filip et al. (2019) proposed a mathematical model to clarify the relationship between the mean diameter and solution parameters in the electrospinning of poly(ethylene oxide) nanofibers.

Various methods have been employed by different authors to investigate nanofiber diameter, such as Sukigara et al. (2004), who explored the spinning of regenerated nanoscale silk fibers from domestic silkworms. Additionally, the experimental method of response surface methodology (RSM) has been applied to model and optimize electrospinning parameters. In recent times, Fatile et al. (2021) have pursued a similar objective by aiming to



comprehend the impact of process parameters on niobium–tungsten oxide nanofibers and optimizing the process using a central composite design (CCD). Furthermore, Zeraati et al. (2021) delved into the study of Nylon-6,6 nanofibers for protection against coronavirus and employed gene expression programming (GEP) and genetic algorithms (GA) in their research.

Other methodologies were also proposed for solving the issue. Ketabchi et al. (2017) studied an artificial neural network (ANN) model. Nasouri et al. (2012) compared the ANN and experimental design of the Box-Behnken Method for the estimation of electrospun polyacrylonitrile (PAN) nanofiber diameter. Kalantari et al. (2020) proposed an approach that combines a multiple linear regression (MLR) model with an ANN model. According to the authors, MLR did not yield better results than ANN. In a similar vein, Kalantari et al. (2019) compared the performance of the multi-layer perception (MLP), radial basis function (RBF), and support vector machine (SVM) models for development of mathematical models to predict the diameter of poly( $\epsilon$ -caprolactone) (PCL)/gelatin (Gt) nanofibers. Likewise, Khalili et al. (2016) investigated the utility of RSM and artificial neural networks (ANNs).

The purpose of the optimizations can be separated in different topics. Zeraati et al. (2021) studied Nylon-6,6 nanofibers for protection against coronavirus. Acatay et al. (2004) investigated the resultant hydrophobic behavior for PAN fibers. Ahmadipourrouposht et al. (2015) researched the process of fabrication of magnetic nanofibers using polyvinyl alcohol (PVA) as a shelter for ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nanoparticles. Amiri et al. (2018) examined the fabrication of chitosan-collagen nanofibers to find optimum diameter.

The aim of this study is to find the relations between the parameters of electrospinning process of PA6 solutions on the nanofiber diameters by RSM and two level full factorial design. The effects of feed rate, tip-to-collector distance, voltage, and polymer concentration were studied within the context of two-level factorial design and RSM.

## 2. Materials & Methods

### 2.1. Materials

Polyamide 6 pellets were purchased from EUROTEC (Tecomid NB40 NL E, unfilled, natural), while formic acid with a purity range of 89–91% was obtained from Merck and used as a solvent for preparing the polymer solutions.

### 2.2. Design of Experiments

Minitab Statistical Software Version 21.4.1 was used to create a full-factorial design of experiments within a constrained region to establish a significant relationship between electrospinning parameters and polymer nanofiber diameter. Feed rate, spinning distance (tip-to-collector), voltage and polymer concentration are the four variables which were used for modeling.

The parameters are differentiated into four factors:

- Factor A: Feed rate (2–4 ml/h),
- Factor B: Tip-to-collector distance “Spinning distance” (5–8 cm),
- Factor C: Voltage (6–10 kV),
- Factor D: Polymer concentration (10–20%, w/w).

Randomized experiments were constructed for a 2-level factorial design. The standard runs for the experiments were determined, and then they were randomly chosen not to face experimental and observational errors. The responses to diameters were obtained, and investigated for this study. The constrained region were identified by the conditions of the experiments. The design contains 16 experiments as shown in Table 1.

### 2.3. Electrospinning

The electrospinning of polyamide 6 (PA6) nanofibers was performed as described by Akkoyun et al. (2021). In the first step, PA6 pellets were dissolved in formic acid to prepare the electrospinning solutions of different concentrations, provided in Table 1, under constant stirring at room temperature.

Then, PA6 nanofibers were electrospun with an electrospinning device (GAYDA Enerji, Türkiye) and using the processing parameters are gathered in Table 1.

### 2.4. Characterization of the nanofibers

The morphology and diameter of the nanofibers were assessed using a HITACHI SU5000 scanning electron microscope at 15 kV. All the samples were sputter coated with gold (Au) before observation. The average fiber diameter was measured with the SEM micrographs using ImageJ software (NIH-USA) from 100 fibers/samples.

**Table 1.** Process parameters obtained from the full factorial experimental design

		Factor A	Factor B	Factor C	Factor D
Std	Run	Feed Rate (mL)	Tip-to-Collector Distance (cm)	Voltage (kV)	Polymer Concentration (wt.%)
1	1	0.325	12.5	13.75	12.5
7	2	0.325	17.5	21.25	12.5
14	3	0.775	12.5	21.25	17.5
5	4	0.325	12.5	21.25	12.5
12	5	0.775	17.5	13.75	17.5
3	6	0.325	17.5	13.75	12.5
11	7	0.325	17.5	13.75	17.5
10	8	0.775	12.5	13.75	17.5
15	9	0.325	17.5	21.25	17.5
9	10	0.325	12.5	13.75	17.5
6	11	0.775	12.5	21.25	12.5
8	12	0.775	17.5	21.25	12.5
16	13	0.775	17.5	21.25	17.5
4	14	0.775	17.5	13.75	12.5
13	15	0.325	12.5	21.25	17.5
2	16	0.775	12.5	13.75	12.5

## 2.5. Explanation of the Process

In the process of calculating significant ranges for input variables have to be determined carefully. It should be large enough to contain the possible parameter space and not to increase the difference of the response surface to actual response. Fiber sample obtained from each experiment run were taken using electron microscopy and studied by observing their fiber morphology and spinning behaviour.

## 3. Results & Discussion

### 3.1. Properties of the nanofibers

The SEM micrographs of the nanofibers obtained from the different runs listed in Table 1 are given in Figure 1.

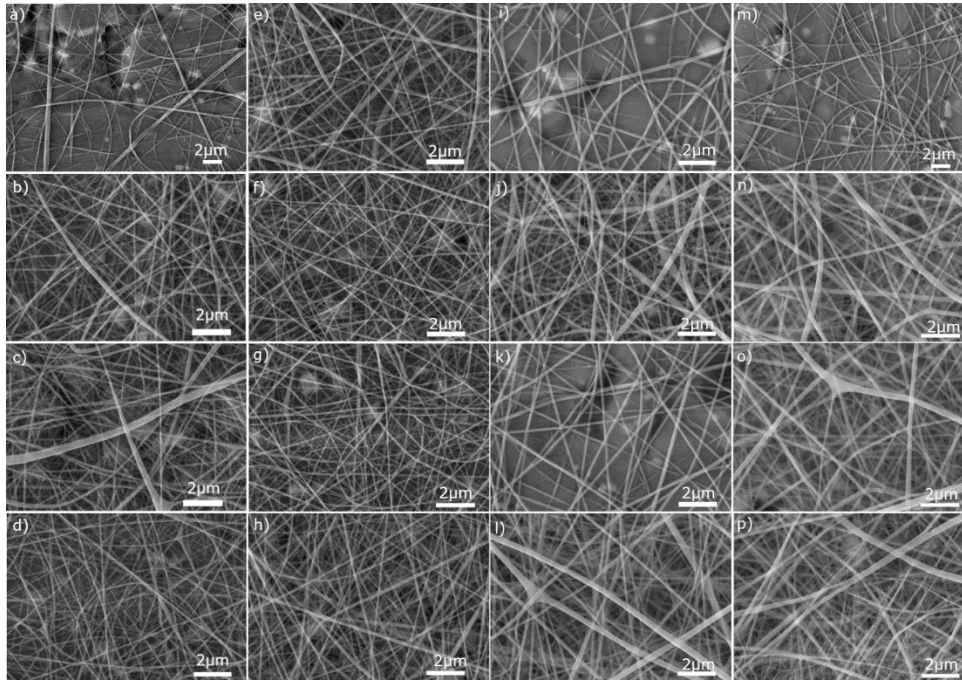
The 16 experimental conditions allowed to produce nanofibers with various morphologies as cylindrical, beaded or with extra webs. As shown in Figure 1, continuous cylindrical nanofibers with a homogeneous diameter were obtained in case f) (run 12). In cases b) (run 2) and g) (run 14), cylindrical nanofibers with different diameters were observed. Although nanofibers were obtained in the other runs, only a few nanofibers are present in case a) (run 1) and the others present nanofibers with different diameters but the presence of thinner extra webs is also noticeable.

The diameters of the nanofiber were also determined from the SEM images. The average diameters corresponding to each sample are given in Table 2. For the statistical analyses, the diameter is qualified as Response 1 and was used to describe the relationships between the different parameters. The average diameters of the nanofibers vary from 90 nm to 205 nm. The best compromise between the morphology and the diameter of the nanofibers was obtained for run 12 where the polymer concentration is 12.5 wt.%.

### 3.2. Two-Level Factorial Experimental Design

A preliminary screening study was conducted to determine the main factors and their interactions on the response of the study.





**Figure 1.** SEM micrographs of the nanofibers produced from a) run 1, b) run 2, c) run 4, d) run 6, e) run 11, f) run 12, g) run 14, h) run 16, a) run 3, j) run 5, k) run 7, l) run 8, m) run 9, n) run 10, o) run 13 and p) run 15

**Table 2.** Experimental results obtained from the different process parameters designed. The diameter is qualified as Response 1 was used to describe the relationships between the different parameters.

		Factor A	Factor B	Factor C	Factor D	Response 1
Std	Run	Feed Rate (mL)	Tip-to-Collector Distance (cm)	Voltage (kV)	Polymer Concentration (wt.%)	Diameter (nm)
1	1	0.325	12.5	13.75	12.5	.120
7	2	0.325	17.5	21.25	12.5	107
14	3	0.775	12.5	21.25	17.5	145
5	4	0.325	12.5	21.25	12.5	125
12	5	0.775	17.5	13.75	17.5	147
3	6	0.325	17.5	13.75	12.5	90.0
11	7	0.325	17.5	13.75	17.5	126
10	8	0.775	12.5	13.75	17.5	149
15	9	0.325	17.5	21.25	17.5	173
9	10	0.325	12.5	13.75	17.5	159
6	11	0.775	12.5	21.25	12.5	118
8	12	0.775	17.5	21.25	12.5	97.0
16	13	0.775	17.5	21.25	17.5	171
4	14	0.775	17.5	13.75	12.5	93.0
13	15	0.325	12.5	21.25	17.5	205
2	16	0.775	12.5	13.75	12.5	108

The feed rate (Factor A), the tip-to-collector distance (Factor B), the high voltage applied (Factor C) and the concentration of the polymer (Factor D) were considered as factors for this purpose. Blocking and confounding were not required and completely randomized design is found enough to go on in this experiment. The full model was fitted to the first response. In this step we would have liked to compare the results of forward selection and

backward elimination to identify important variables. They were classified respectively as first model and second model for the experiment. In forward selection, main factors and interactions were entered into the equation one by one and at the last step the main factors B, C, D were selected. The results can be seen in Table-3.  $\alpha$  was taken as 0.1. Then, backward elimination was used to determine the equation. Firstly, all interactions and main factors are included, secondly the insignificant parameters are excluded from the equation.

**Table 3.** Forward Selection of Terms (Candidate terms: A; B; C; D; A\*B; A\*C; A\*D; B\*C; B\*D; C\*D; A\*B\*C; A\*B\*D; A\*C\*D; B\*C\*D; A\*B\*C\*D)

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	133.31		133.31		133.31	
D	26.06	0.000	26.06	0.000	26.06	0.000
C			9.31	0.048	9.31	0.032
B					-7.81	0.064
S		19.2416		17.0876		15.3277
R-sq		67.71%		76.35%		82.44%
R-sq(adj)		65.40%		72.71%		78.05%
R-sq(pred)		57.82%		64.18%		68.78%
AICc		145.90		144.55		144.15
BIC		146.21		144.00		142.02

$\alpha$  to enter = 0,1

At last, A, B, C, D main factors and AB interactions are selected for the last result. The equation can be seen in Table-4 and 9. In the process of selecting variables for inclusion in the model, the hierarchy principle are followed and all main effects are kept that are part of significant higher-order terms or interactions, even if the main effect p-value is larger than expected.

**Table 4.** Backward Elimination of Terms (Candidate terms: A; B; C; D; A\*B; A\*C; A\*D; B\*C; B\*D; C\*D; A\*B\*C; A\*B\*D; A\*C\*D; B\*C\*D; A\*B\*C\*D)

	----Step 1----		----Step 2----		----Step 3----		----Step 4----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	133.31		133.31		133.31		133.31	
A	-4.81	0.068	-4.81	0.114	-4.81	0.162	-4.81	0,136
B	-7.81	0.016	-7.81	0.027	-7.81	0.041	-7.81	0,029
C	9.31	0.009	9.31	0.014	9.31	0.022	9.31	0,014
D	26.06	0.000	26.06	0.000	26.06	0.000	26.06	0,000
A*B	6.31	0.031	6.31	0.054	6.31	0.082	6.31	0,063
A*C	-5.06	0.060	-5.06	0.100	-5.06	0.145	-5.06	0,120
A*D	-1.56	0.466	-1.56	0.561	-1.56	0.623		
B*D	2.69	0.239	2.69	0.334	2.69	0.408	2.69	0,378
C*D	4.81	0.068	4.81	0.114	4.81	0.162	4.81	0,136
A*B*D	4.81	0.068	4.81	0.114				
A*C*D	-4.06	0.105						
S		7.76611		10.0530		12.0822		11,4326
R-sq		98.50%		96.85%		94.54%		94,30%
R-sq(adj)		94.36%		90.56%		86.36%		87,79%
R-sq(pred)		75.95%		67.76%		61.20%		70,22%
AICc		296.82		228.65		197.45		174,15
BIC		124.86		133.92		139.95		137,87

	-----Step 5-----		-----Step 6-----		-----Step 7-----	
	Coef	P	Coef	P	Coef	P
Constant	133.31		133.31		133.31	
A	-4.81	0.128	-4.81	0.157	-4.81	0.183
B	-7.81	0.025	-7.81	0.034	-7.81	0.043
C	9.31	0.011	9.31	0.015	9.31	0.020
D	26.06	0.000	26.06	0.000	26.06	0.000
A*B	6.31	0.057	6.31	0.074	6.31	0.090
A*C	-5.06	0.112	-5.06	0.139		
A*D						
B*D						
C*D	4.81	0.128				
A*B*D						
A*C*D						
S		11.3496		12.4769		13.4578
R-sq		93.58%		91.27%		88.72%
R-sq(adj)		87.96%		85.45%		83.08%
R-sq(pred)		74.32%		72.41%		71.11%
AICc		160.05		153.54		149.07
BIC		137.00		139.15		140.48

$\alpha$  to remove = 0,1

The initial model was saturated. The stepwise procedure removed the following terms in order to obtain sufficient degrees of freedom to begin: B\*C; A\*B\*C; B\*C\*D; A\*B\*C\*D

These two results were selected for the reason that the first model has the lowest value of AICc, value with 3 significant factors for  $\alpha=0.1$  (almost can be said for  $\alpha=0.05$ ) and the second one have the highest R sq, Adj R sq and Pred. R sq and not possessing too much high value of BIC value from Table-9. Furthermore, at the first model p value of the coefficients are lower than 0.1 and also 0.05; except for the factor B, which is lower than 0.1, but higher than 0.05. At the second model, p value of the coefficients which are stated at the first model, still significant but AB interaction is between 0.05 and 0.10 and also factor A and AB interaction do not effect the result too much when we compare others.

When all models have been investigated through Table 5-6, it is clearly seen that the main factor coefficients have a clear effect on results. Therefore, the effect of linear coefficients must be investigated carefully. The polymer concentration exhibits a pronounced impact on the results when compared to the other parameters.

**Table 5.** Analysis of Variance of the first model

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	13232.2	82.44%	13232.2	4410.7	18.77	0.000
Linear	3	13232.2	82.44%	13232.2	4410.7	18.77	0.000
B	1	976.6	6.08%	976.6	976.6	4.16	0.064
C	1	1387.6	8.64%	1387.6	1387.6	5.91	0.032
D	1	10868.1	67.71%	10868.1	10868.1	46.26	0.000
Error	12	2819.3	17.56%	2819.3	234.9		
Total	15	16051.4	100.00%				

**Table 6.** Analysis of Variance of the second model

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	14240.3	88.72%	14240.3	2848.1	15.73	0.000
Linear	4	13602.8	84.74%	13602.7	3400.7	18.78	0.000
A	1	370.6	2.31%	370.6	370.6	2.05	0.183
B	1	976.6	6.08%	976.6	976.6	5.39	0.043
C	1	1387.6	8.64%	1387.6	1387.6	7.66	0.020
D	1	10868.1	67.71%	10868.1	10868.1	60.01	0.000
2-Way Interactions	1	637.6	3.97%	637.6	637.6	3.52	0.090
A*B	1	637.6	3.97%	637.6	637.6	3.52	0.090
Error	10	1811.1	11.28%	1811.1	181.1		
Total	15	16051.4	100.00%				

### 3.3. Regression analysis

Coded and uncoded coefficients of equations were also examined and the results are gathered in Table-7. It is absolutely observed that the coefficient of factor D (polymer concentration) is the highest one in every equation and the significance of this factor can be seen in determining the main effects. The coefficients of B, C and D variables are found significant in regression equation for the first model. Then, except from B, C and D are still found significant. The factor B is also remarkably close to the value of 0.05. Therefore, they can be put into the equation to see their specific result on the equation. The coefficients of A, B, C and D main factors and AB interaction are found significant in the regression equation for the second model. Besides, except from AB and A, C and D are also found significant. It can be observed that, factor A is not too close to the value of significant value, but due to the hierarchy principle and effect of AB interaction, it was put to the equation.

**Table 7.** Coded Coefficients of the first model

Term	Effect	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant		133.31	3.83	(124.96; 141.66)	34.79	0.000	
B	-15.63	-7.81	3.83	(-16.16; 0.54)	-2.04	0.064	1.00
C	18.63	9.31	3.83	(0.96; 17.66)	2.43	0.032	1.00
D	52.13	26.06	3.83	(17.71; 34.41)	6.80	0.000	1.00

**Table 8.** Coded Coefficients of the second model

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		133.31	3.36	39.62	0.000	
A	-9.63	-4.81	3.36	-1.43	0.183	1.00
B	-15.63	-7.81	3.36	-2.32	0.043	1.00
C	18.63	9.31	3.36	2.77	0.020	1.00
D	52.12	26.06	3.36	7.75	0.000	1.00
A*B	12.63	6.31	3.36	1.88	0.090	1.00

### 3.4. Tests & Models

The statistical and regression analysis parameters are gathered in Figure-2 and Figure-3. It can be seen from Table-9 that high  $R^2$  and adjusted  $R^2$  values can be obtained. The second analysis provided better results for  $R^2$  values.

However, the value of AICc is in second analysis higher than the first analysis one and non-significant parameters (factor A higher than  $\alpha=0.1$  and the interaction AB value almost equal) are added to the regression equation.

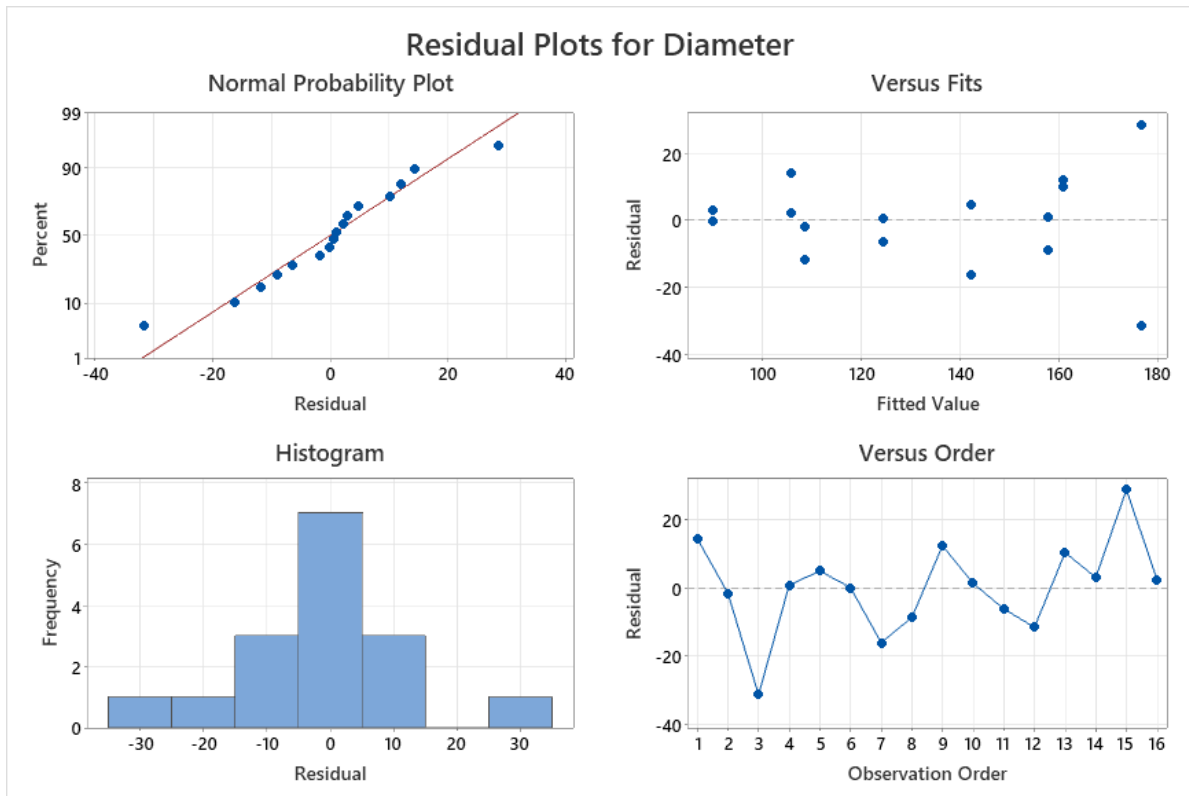


Figure 2. The residual plots of the first model

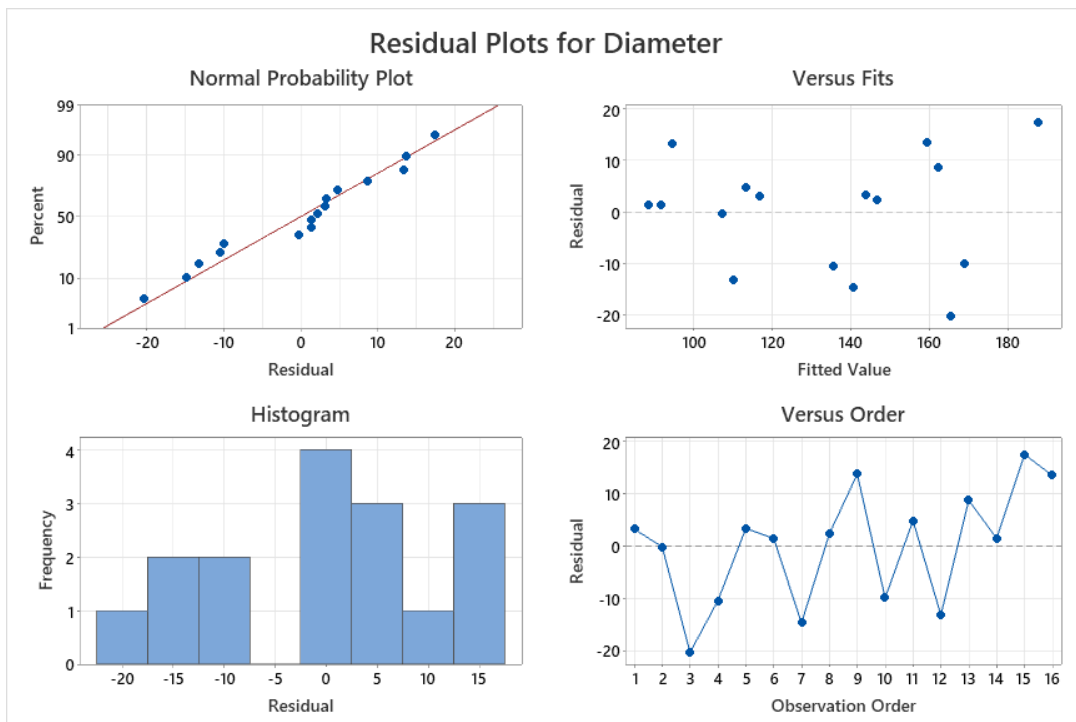


Figure 3. The residual plots of the second model

According to these results, the polymer concentration can directly have an effect on the fiber morphology. The surface tension has a decreasing trend on surface area and favors the formation of particles, while viscoelastic forces promote the formation of fibres (Amarieri et. al., 2017). The surface tension may have a high impact over viscoelastic forces at low polymer concentrations. On the other hand, a high viscosity makes the extension of the jet difficult and therefore thick fibres can be observed at high polymer concentrations.

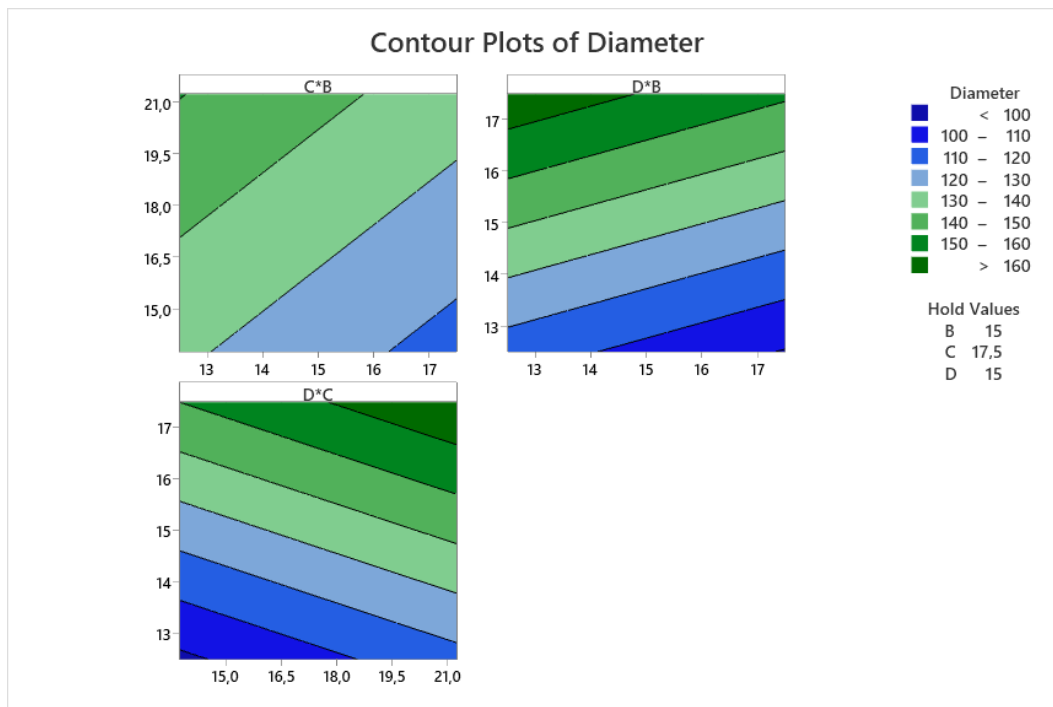
Two level four factor design were included in this study and for different levels a second experimental design have been applied to understand the interactions between the parameters. To enhance the predictive capability of the model, it is essential to strike a balance between a well-defined operational range and sufficient inclusion of distant data points.

The distribution of first model maybe more fitted to normal distribution than the second one. The residuals were identically distributed. Independency are seen for both models and normal distribution can be observed for both models. The residual-observation order graph for the second model show a little oscillation. To sum up, all the information derived from residual analysis show that the suitability of first model is slightly better than the second model.

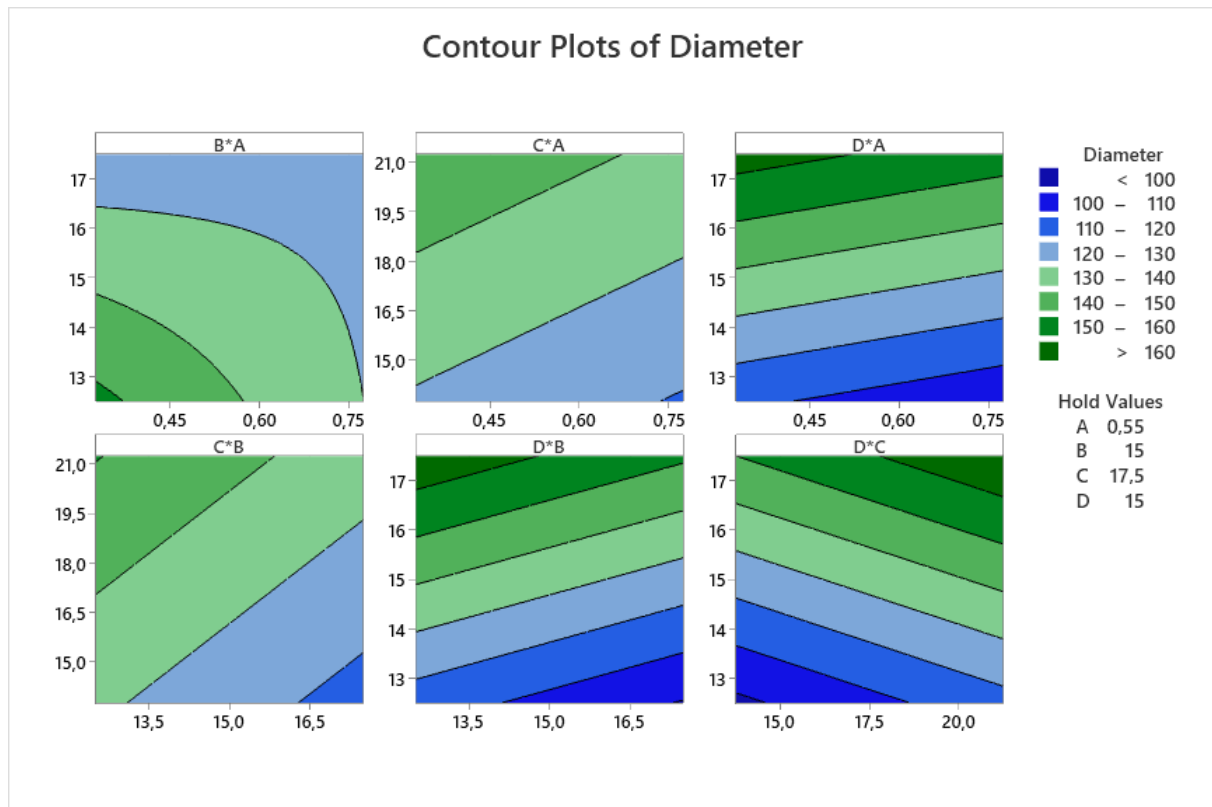
**Table 9.** Statistical results and uncoded coefficients of the models for 2 different alternatives

Model Summary-1				Regression Equation in Uncoded Units-1	
<b>S</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq (adj)</b>	<b>R-sq (pred)</b>	<b>R1</b>	-19.6 - 3.12 B
15.3277	82.44%	78.05%	68.78%		+ 2.48 C
Model Summary-2					+ 10.43 D
<b>S</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq(adj)</b>	<b>R-sq(pred)</b>	<b>R1</b>	84.7 - 189.7 A - 9.30 B
13.4578	88.72%	83.08%	71.11%		+ 2.483 C + 10.43 D
					+ 11.22 A*B

Contour plots provided in Figures 4 and 5 show that for the first model, the effect of D compared to C and B is too much high. Also, for the second equation, the effect of D is still too high. Also the interaction of A and B can be observed from A-B contour plot.



**Figure 4.** The contour plots of the first model



**Figure 5.** The contour plots of the second model

Taking the vectors of input and finding the relationship with outputs are the next step of the study at the end of computer runs and experiments. Developing an appropriate model depends on the true relationship between the inputs and outputs. The creation of experimental designs has been applied by using full factorial design. In this study, two-level-full factorial design was used in order to lower experimental combinations to procure maximum amount of information for a better evaluation of the model.

#### 4. Conclusion

Two-level factorial design possesses a great capability of examining the affinity between the factor variables and outputs of experiments. Moreover, it also enables a thorough observation of the interactions between the variables. When the comparison of basic experimental/ optimization methods and one variable at a time technique are stated, this method has been useful for taking the results with much less data. For the first model, a two-level full factorial design revealed that the polymer concentration and the applied voltage directly influence the nanofiber diameter, whereas spinning distance exhibit an inverse relationship with the diameter of the produced nanofibers. For the second model, the same evolution is observed for the polymer concentration, applied voltage and spinning distance with the diameter of the produced nanofibers. The added parameters of feed rate, interaction of feed rate and spinning distance are also shown in the equation. The interaction has too much effect than feed rate. Their effects are not too much significant but they contribute to the explanation for understanding the equation of the second model. The main concluding remarks of this study are (1) The approach of the study provides new results compared to the literature. (2) The accurate design of the experiments can help researchers to find significant results with fewer experiment numbers. (3) These kinds of study is open to everyone in direction of future research on the electrospinning of different types of polymers.

#### Contribution of Authors

Deniz Efendioğlu carried out design and data analysis, methodology , experimental design, interpretation of model results, writing & editing. Şerife Akkoyun carried out conceptualization, investigation, resources, experimentation, data curation, methodology, writing-review & editing.



## Conflict of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

## References

- Acatay, K. (2004). Generation of superhydrophobic surfaces by electrospinning process (Doctoral dissertation) DOI: <https://research.sabanciuniv.edu/id/eprint/8213>
- Ahmadipourroudposht, M., Fallahiarezoudar, E., Yusof, N. M., & Idris, A. (2015). Application of response surface methodology in optimization of electrospinning process to fabricate (ferrofluid/polyvinyl alcohol) magnetic nanofibers. *Materials Science and Engineering: C*, 50, 234-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.02.008>
- Akkoyun S., Öktem N., (2021), Effect of viscoelasticity in polymer nanofiber electrospinning: Simulation using FENE-CR model. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(3), 620-630 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.12.017>
- Amariei, N., Manca, L. R., Berteau, A. P., Berteau, A., & Popa, A. (2017, June). The influence of polymer solution on the properties of electrospun 3D nanostructures. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 209, No. 1, p. 012092). IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012092>
- Amiri, N., Moradi, A., Tabasi, S. A. S., & Movaffagh, J. (2018). Modeling and process optimization of electrospinning of chitosan-collagen nanofiber by response surface methodology. *Materials Research Express*, 5(4), 045404. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaba1d>
- Fatile, B. O., Pugh, M., & Medraj, M. (2021). Optimization of the Electrospun Niobium–Tungsten Oxide Nanofibers Diameter Using Response Surface Methodology. *Nanomaterials*, 11(7), 1644. DOI: <https://doi.org/10.3390/nano11071644>
- Filip, P., & Peer, P. (2019). Characterization of poly (ethylene oxide) nanofibers—Mutual relations between mean diameter of electrospun nanofibers and solution characteristics. *Processes*, 7(12), 948. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7120948>
- He, H., Wang, Y., Farkas, B., Nagy, Z. K., & Molnar, K. (2020). Analysis and prediction of the diameter and orientation of AC electrospun nanofibers by response surface methodology. *Materials & Design*, 194, 108902. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108902>
- Kalantary, S., Jahani, A., & Jahani, R. (2020). MLR and Ann approaches for prediction of synthetic/natural nanofibers diameter in the environmental and medical applications. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65121-x>
- Kalantary, S., Jahani, A., Pourbabaki, R., & Beigzadeh, Z. (2019). Application of ANN modeling techniques in the prediction of the diameter of PCL/gelatin nanofibers in environmental and medical studies. *RSC advances*, 9(43), 24858-24874. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RA04927D>
- Ketabchi, N., Naghibzadeh, M., Adabi, M., Esnaashari, S. S., & Faridi-Majidi, R. (2017). Preparation and optimization of chitosan/polyethylene oxide nanofiber diameter using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 28(11), 3131-3143. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2212-0>
- Khalili, S., Khorasani, S. N., Saadatkish, N., & Khoshakhlagh, K. (2016). Characterization of gelatin/cellulose acetate nanofibrous scaffolds: Prediction and optimization by response surface methodology and artificial neural networks. *Polymer Science Series A*, 58(3), 399-408. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0965545X16030093>
- Naderi, N., Agend, F., Faridi-Majidi, R., Sharifi-Sanjani, N., & Madani, M. (2008). Prediction of nanofiber diameter and optimization of electrospinning process via response surface methodology. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 8(5), 2509-2515. DOI: <https://doi.org/10.1166/jnn.2008.536>
- Nasouri, K., Bahrambeygi, H., Rabbi, A., Shoushtari, A. M., & Kafrou, A. (2012). Modeling and optimization of electrospun PAN nanofiber diameter using response surface methodology and artificial neural networks. *Journal of Applied Polymer Science*, 126(1), 127-135. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.36726>



Sukigara, S., Gandhi, M., Ayutsede, J., Micklus, M., & Ko, F. (2004). Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning. Part 2. Process optimization and empirical modeling using response surface methodology. *Polymer*, 45(11), 3701-3708. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.03.059>

Thompson, C. J., Chase, G. G., Yarin, A. L., & Reneker, D. H. (2007). Effects of parameters on nanofiber diameter determined from electrospinning model. *Polymer*, 48(23), 6913-6922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2007.09.017>

Zeraati, M., Pourmohamad, R., Baghchi, B., Chauhan, N. P. S., & Sargazi, G. (2021). Optimization and predictive modelling for the diameter of nylon-6, 6 nanofibers via electrospinning for coronavirus face masks. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(11), 101348. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101348>



# Journal of Turkish Operations Management

## Akran grup durumları ve oyun teorisi ile modellenmesi üzerine

Medine Demir<sup>1\*</sup>, Pınar Usta<sup>2</sup>, Zeynep Sırma Alparslan Gök<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat, Fakültesi, Matematik Bölümü, Isparta, Türkiye e-mail: medinemugla@hotmail.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-9543-0753>

<sup>2</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye e-mail: pinarusta@isparta.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9809-3855>

<sup>3</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Edebiyat, Fakültesi, Matematik Bölümü, Isparta, Türkiye e-mail: zeynepalparslan@yahoo.com, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9435-0527>

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 05.05.2023  
Revize: 11.01.2024  
Kabul: 20.03.2024

#### Anahtar Kelimeler:

İşbirlikçi Oyun Teorisi,  
Yöneylem Araştırması,  
Akran Grup Durumları

### Özet

Akran grup durumları ve buna bağlı kurulan oyunlar çeşitli ekonomik ve Yöneylem araştırması problemlerinde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin ihalelerde koalisyonel davranış çalışıldığı zaman ortaya çıkan işbirlikçi oyunların bir kısıtlanmış sınıfı akran grup oyunları ile ifade edilmektedir. Akran grup durumlarında, organizasyonların sosyal yapılandırması, tüm oyuncu grupların potansiyel olasılıklarını etkilemektedir. Bir hiyerarşide verilen her bir oyuncu bir ya da daha çok oyuncunun yardımıyla doğrudan veya dolaylı olarak lider ile ilişkilidir. Bir oyuncuya ait olan ekonomik olasılık hiyerarşi içerisindeki konumu ile kısıtlanmaktadır. Akran grubundaki oyuncu için önemli olan grup lideri oyuncunun kendisi ve lideri arasında verilen hiyerarşide var olan tüm orta düzeydeki oyuncuların oluşturduğu grup olarak karşımıza çıkmaktadır. Oyuncuların böyle bir grubu akran grup olarak adlandırılmaktadır. Çalışmamızda, öncelikle işbirlikçi oyun teorisi ve akran grup durumlarını içeren bir literatür taraması yapılmıştır. Daha sonra işbirlikçi oyun teorisinin temel kavramları ve çözüm yöntemleri açıklanmıştır. Son olarak, akran grup durumları ve oyun teorisi kullanılarak modellenmesi üzerinde çalışılmış ve bir örnek üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada aynı zamanda akran grup oyunlarının gerçek yaşamımızda ihale durumları, sıralama durumları ve havaalanı durumları gibi farklı ekonomik ve yön eylem araştırması durumlarında da kullanılabilir olduğu gösterilmektedir.

## Peer Group Situations and Modeling with Game Theory

### Article Info

#### Article History:

Received: 05.05.2023  
Revised: 11.01.2024  
Accepted: 20.03.2024

#### Keywords

Cooperative Game Theory,  
Operations research,  
Peer Group Situations

### Abstract

Peer group situations and related games appear in various economic and operations research problems. For example, when studying coalition behavior in auctions, a constrained class of cooperative games that emerges is expressed through peer group games. In peer group situations, the social configuration of organizations affects the potential possibilities of all player groups. In a hierarchy, each player is directly or indirectly related to the leader with the help of one or more players. The economic possibilities belonging to a player are constrained by their position in the hierarchy. The important group for a player in a peer group situation consists of the leader, the player itself, and all intermediate players in the given hierarchy between the player and the leader. Such a group of players in a peer group is an important group for the player. In our study, first, a literature review covering cooperative game theory and peer group situations is conducted. Then, the basic concepts and solution methods of cooperative game theory are explained. Finally, work is done on modeling peer group situations using game theory, and an application is made on an example. The study also demonstrates that peer group games can be applicable in various economic and operations research scenarios in real life, such as auction situations, ranking situations, and airport situations.

## 1. Giriş

Birçok ekonomik durumda, organizasyonun sosyal yapısı, tüm oyuncu gruplarının potansiyel ekonomik olanaklarını etkiler. Bu tür kısıtlamaların ekonomik işbirlikçi davranış üzerindeki sonuçlarını analiz etmek için oyun teorisi bir yaklaşım olarak kullanılmaktadır.

Akran grup durumları, organizasyon içindeki ajanların bir araya gelerek işbirliği yapabilecekleri, iletişim kurabilecekleri veya belirli bir sıralamaya tabi olabilecekleri durumları içerebilir. Bu durumlar genellikle işbirlikçi oyun teorisi veya yöneylem araştırması gibi disiplinlerde incelenir. Akran grup durumları, bir gruptaki sosyal ilişkilerin ve işbirliğinin analizinde önemli bir rol oynar.

Akran grup oyunları, bir organizasyon içindeki oyuncuların bir hiyerarşi içinde düzenlenmiş olduğu durumları ifade eder. Bu durumda, her oyuncu, liderle doğrudan veya dolaylı bir ilişkiye sahiptir, diğer bir deyişle, oyuncular birbirleriyle bir hiyerarşi içinde bağlantılıdır. Akran grup durumları ve ilgili oyunlar, bu hiyerarşik yapı içinde ortaya çıkan işbirliği ve etkileşimleri anlamak için kullanılır.

Özellikle, bir ağaç yapısının oluşturduğu bir hiyerarşide, her bir oyuncunun akran grubu, ağacın kökü ile oyuncunun düğümünü birleştiren yoldaki diğer oyuncularından oluşur.

Bir hiyerarşide her oyuncu, lider oyuncuyla doğrudan veya dolaylı olarak bir ilişkiye sahiptir. Bu ilişki bir veya daha fazla başka oyuncunun yardımıyla gerçekleşebilir. Bir oyuncu için önemli olan grup, lider, ajanın kendisi ve verilen hiyerarşide bulunan tüm ara oyuncularından oluşur. Oluşan bu gruba akran grup denir. Hiyerarşi, liderin kökünde bulunan bir liderle başlayan, her diğer oyuncunun farklı bir düğümde konumlandığı köklü bir yönlendirilmiş ağaç ile tanımlanabilir. Her oyuncunun akran grubu, o oyuncuyu liderle birleştiren yol üzerinde bulunan diğer oyuncuya karşılık gelir.

Literatürde akran grup oyunları ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Branzei vd. (2002); Branzei vd. (2010); (Alparslan Gök vd., 2018). Akran grup durumlarını işbirlikçi oyun teorisi ile ele alan ilk çalışma Branzei vd. (2002)' dir. Açık arttırmalar gibi farklı ekonomik durumların, iletişim, sıralama ve akış durumları gibi farklı yöneylem araştırması durumlarının akran grup oyunları ile ilişkili olduğu bu çalışmada gösterilmiştir. Branzei vd. (2010) akran grup oyunlarını aralık belirsizliği altında incelemiş, konu ile ilgili çözüm yöntemleri geliştirmiştir. Alparslan Gök vd., (2018) ise akran grup oyunlarını gri sayılar kullanarak incelemiştir. Akran grup oyunlarının teorik altyapısını oluşturan işbirlikçi oyun teorisi ve ön eylem araştırması durumlarını içeren bazı literatür çalışmaları arasında Deng ve Papadimitriou (1994); Gilles vd., (1992); Myerson, (1977) ve Owen (1986) verilebilir.

Bu çalışmada Akran durum durumları ve buna bağlı kurulan oyunlar çeşitli ekonomik ve Yöneylem araştırmasına yönelik problemler ele alınmıştır. Çalışmanın geri kalanı şu şekildedir; İkinci bölümde İşbirlikçi oyun teorisinin temel kavramlarından bahsedilmiş ve çeşitli örnekler verilmiştir. Üçüncü bölüm akran grup durumları ve oyun teorisi ile modellenmesi üzerinedir. Bu kısımda akran grup oyunlarını içeren örnekler verilmiştir. Dördüncü bölüm akran grup oyunlarının ekonomik ve yön eylem araştırması uygulamalarına yöneliktir. Çalışma sonuç bölümü ile tamamlanmaktadır, bu kısımda akran grup durumlarının oyun teorisine modellenmesi ile ilgili yorumlar yapılarak gelecekte çalışılabilecek konular hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. İşbirlikçi Oyun Teorisi

İşbirlikçi Oyun Teorisine ait başlıca temel kavramlar bu bölümde ele alınacaktır. Shapley, (1953); Curiel, (1997); Tijs, (2003); Branzei, (2008) ait çalışmalarda İşbirlikçi Oyun Teorisine ait detaylı bilgiler bulunmaktadır.

Modelde oyuncu kümesi ve oyunculara ait kazanç veya maliyetleri gösteren karakteristik bir fonksiyon bulunmaktadır. Burada oyuncular içerisinde koalisyon yapılmakta ve oyun kurulduktan sonraki kazançların ya da maliyetlerin adil bir şekilde nasıl dağıtılacağı incelenmektedir.

**Tanım 2.1**  $n$  -kişilik bir işbirlikçi oyun  $\langle N, v \rangle$  ikilisinden oluşur. Burada  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  oyuncu kümesi  $v: 2^N \rightarrow \mathbb{R}$  karakteristik fonksiyondur. Karakteristik fonksiyon  $\forall S \subset N$  koalisyonunu bir reel sayıya götürmektedir. Yani  $\forall S \in 2^N$  için  $v(S)$  koalisyonunun değeridir ve  $v(\emptyset) = 0$  olarak tanımlıdır.

**Örnek 2.1 (Eldiven Oyunu)** Oyuncuların kümesi  $N = \{1,2,3\}$  olmak üzere  $L = \{1\}$  ve  $R = \{2,3\}$  olsun.  $L$  kümesinin elemanlarının sol el eldiven imal ettiği  $R$  kümesinin elemanlarının ise sağ el eldiven imal ettiği bilinmektedir. Tek el eldiven imal etmenin maliyeti sıfır iken, çift eldiven imalatının bedeli ise 10 TL olduğu bilindiği üzere  $\langle N, v \rangle$  oyunu

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	0	0	0	10	10	0	10

şeklinde modellenir (Tijs, (2003)).

Bütün koalisyonların oluşturulmasına bağlı olarak, elde edilen kazancın veya maliyetin hangi şekilde paylaşılacağı İşbirlikçi Oyun Teorisine ait en temel problemlerden biridir. Buradaki çözüm kavramlarına; von Neumann (1928) 'ın bulduğu "von Neumann çözümü", von Neumann (1944)'ın ürettiği "kararlı kümeler", Shapley (1953)'nin ürettiği "Shapley değeri" örnek olarak gösterilebilir. Bu şekildeki bir işbirlikçi Oyun Teorisinde çözüm kavramı, asgari olarak bir  $x = (x_i) \in \mathbb{R}^N$  ödeme vektörüne karşılık gelir. İşbirlikçi Oyun Teorisindeki çözüm kavramlarını daha iyi anlamak için aşağıdaki tanımlara değinilmelidir.

Shapley değeri için önce marjinal katkı vektörünün tanımı verilmelidir.

**Tanım 2.2 (Marjinal Katkı)**  $v \in G^N$  ve  $\sigma \in \pi(N)$  olsun.  $v \in m^\sigma(v) \in \mathbb{R}^N$  marjinal katkı vektörü,  $\forall i \in N$  için,

$$m_i^\sigma(v) := v(P^\sigma(i) \cup \{i\}) - v(P^\sigma(i)) \text{ ile gösterilir.}$$

**Tanım 2.3 (Shapley değeri)**  $v \in G^N$  oyununun Shapley değeri olan  $\Phi(v)$ , bir oyunun marjinal vektörlerinin ortalamasıdır. Yani,  $\Phi(v) = \frac{1}{n!} \sum_{\sigma \in \pi(N)} m^\sigma(v)$  dir.

Bu denklem dikkate alındığında, Shapley değerinin olasılık yorumu yapılabilir.  $\pi(N)$ 'nin elemanlarının içinde bulunduğu bir torbadan bir permütasyonu  $\frac{1}{n!}$  olasılıkla çekebilir. Bu durumda, oyuncular odaya  $\sigma$  permütasyonu sırasında bir bir girer ve her oyuncu odaya marjinal katkıda bulunur. Shapley değeri

$$\Phi(v) = \frac{1}{n!} \sum_{\sigma \in \pi(N)} (v(P^\sigma(i) \cup \{i\}) - v(P^\sigma(i))) \text{ formülü ile de ifade edilir.}$$

**Örnek 2.2** Üç kişilik  $\langle N, v \rangle$  oyunu ve oyunun karakteristik fonksiyonları aşağıda gösterildiği gibi olsun.

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	0	0	0	6	18	12	18

Bu durumda Shapley değeri hesabı için önce marjinal katkı vektörleri Tablo 1'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Marjinal vektörler

$\sigma$	$m_1^\sigma(v)$	$m_2^\sigma(v)$	$m_3^\sigma(v)$
$\sigma_{1=}. (1,2,3)$	0	6	12
$\sigma_{2=}. (1,3,2)$	0	0	18
$\sigma_{3=}. (2,1,3)$	6	0	12
$\sigma_{4=}. (2,3,1)$	6	0	12
$\sigma_{5=}. (3,1,2)$	18	0	0
$\sigma_{6=}. (3,2,1)$	6	12	0

$$\Phi(v) = \frac{1}{3!} \sum_{\sigma \in \pi(3)} m^\sigma(v) = (5,3,9) \text{ olarak bulunur.}$$

**Tanım 2.4 (Banzhaf değeri)** 1965 yılında Banzhaf (1965)'ın bulduğu değer  $\beta(v)$  ile gösterilir.  $\forall i \in N$  ve  $v \in G^N$  için

$\beta: G^N \rightarrow \mathbb{R}^N$  olmak üzere  $\beta_i(v) = \frac{1}{2^{|N|-1}} \sum_{i \in S} v(S) - v(S \setminus \{i\})$  ile tanımlanır.

**Uyarı:** Bundan sonraki kısımlarda kolaylık açısından  $v(\{i, j\})$  notasyonu yerine  $v(ij)$  notasyonu kullanılacaktır.

**Örnek 2.3** Oyuncuların kümesi  $N = \{1,2,3\}$ ,  $v \in G^N$  olmak üzere koalisyon değerleri

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	0	0	0	20	8	0	28

olarak verilsin. Buna göre bu oyunun  $\beta(v)$  değeri;

$$\begin{aligned} \beta_i(v) &= \frac{1}{2^{|N|-1}} \sum_{i \in S} (v(S) - v(S \setminus \{i\})) \\ \beta_1(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{1 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{1\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(1) + v(12) - v(2) + v(13) - v(3) + v(123) - v(23)) \\ &= 14 \\ \beta_2(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{2 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{2\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(2) + v(12) - v(1) + v(23) - v(3) + v(123) - v(13)) \\ &= 10 \\ \beta_3(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{3 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{3\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(3) + v(13) - v(1) + v(23) - v(2) + v(123) - v(12)) \\ &= 4 \end{aligned}$$

$\beta(v) = (14, 10, 4)$  olarak bulunur.

**Tanım 2.5 (Kısıt kümesinin ağırlık merkezi çözümü)** CIS değerini Driessen ve Funaki (1991) bulmuştur.

$\forall v \in G^N, \forall i \in N$  için  $CIS: G^N \rightarrow \mathbb{R}^N$  olmak üzere  $CIS_i(v) = v(\{i\}) + \frac{1}{|N|} (v(N) - \sum_{j \in N} v(\{j\}))$  olarak tanımlanır.

**Örnek 2.4** Oyuncuların kümesi  $N = \{1,2,3\}$ ,  $v \in G^N$  olmak üzere koalisyon değerleri de

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	2	2	5	3	1	2	15

olarak verilsin. Bu oyunun  $CIS(v)$  değeri;

$$\begin{aligned} CIS_i(v) &= v(i) + \frac{1}{|N|} (v(N) - \sum_{j \in N} v(j)) \\ CIS_1(v) &= v(1) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\ &= 4 \\ CIS_2(v) &= v(2) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\ &= 4 \\ CIS_3(v) &= v(3) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\ &= 7 \end{aligned}$$

$CIS(v) = (4, 4, 7)$  olarak bulunur.

**Tanım 2.6 (Eşitlikçi Bölünemeyen katkı değeri)** ENSC-değerini Driessen ve Funaki (1991) bulmuştur. Bu değer CIS-değerinin duali olarak tanımlanmaktadır. Yani  $\forall v, v^* \in G^N$  ve  $v^*, v$  nin dual oyunu olsun.

$ENSC(v) = CIS(v^*)$  olur.

Bir oyunun duali

$\forall v, v^* \in G^N$  ve  $\forall S \in 2^N$  için,  $v^*(S) = v(S) - v(N \setminus S)$  dir.

**Önerme 2.1**  $\forall S \in 2^N$  için  $ENSC: G^N \rightarrow \mathbb{R}^N$  olup  $\forall i \in N$  için

$$ENSC_i(v) = -v(N \setminus \{i\}) + \frac{1}{|N|} (v(N) + \sum_{j \in N} v(N \setminus \{j\}))$$

olur.

**Örnek 2.5** Oyuncuların kümesi  $N = \{1,2,3\}$ ,  $v \in G^N$  ve koalisyon değerleri de

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	3	2	0	8	4	5	7

olarak verilsin. Buna göre  $ENSC(v)$  değeri;

$$ENSC_i(v) = -v(N \setminus \{i\}) + \frac{1}{|N|} (v(N) + \sum_{j \in N} v(N \setminus \{j\}))$$

$$ENSC_1(v) = -v(23) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23))$$

$$= 3$$

$$ENSC_2(v) = -v(13) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23))$$

$$= 4$$

$$ENSC_3(v) = -v(12) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23))$$

$$= 0$$

$ENSC(v) = (3,4,0)$  olarak bulunur.

**Tanım 2.7 (Eşit Dağıtım Değeri)**  $ED$ -değeri oyunculara büyük koalisyonu eşit olarak paylaştıran  $ED$ -değeri

$\forall i \in N$  için,  $ED: G^N \rightarrow \mathbb{R}^N$  için  $ED_i(v) = \frac{1}{|N|} v(N)$  olarak tanımlanır.

**Örnek 2.6** Oyuncuların kümesi  $N = \{1,2,3\}$  ve koalisyon değerleri de

$S$	$\emptyset$	$\{1\}$	$\{2\}$	$\{3\}$	$\{1,2\}$	$\{1,3\}$	$\{2,3\}$	$\{1,2,3\}$
$v(S)$	0	4	2	0	5	3	2	9

olsun. Bu oyunun  $ED$  -değeri

$$ED_i(v) = \frac{1}{|N|} v(N)$$

$$ED_1(v) = \frac{1}{3} v(123) = 3$$

$$ED_2(v) = \frac{1}{3} v(123) = 3$$

$$ED_3(v) = \frac{1}{3} v(123) = 3 \text{ olup}$$

$ED(v) = (3,3,3)$  olarak bulunur.

### 3. Akran Grup Durumlarının Oyun Teorisi ile Modellenmesi

Bu bölümde kısaca modellemeye kullanılacak akran grup durumları hakkında bilgi verilecektir.

Sosyal özellikler, oyuncuların ilişkilerini tanımlayan sıkı bir hiyerarşi ile sunulsun. Sunulan bu tür bir hiyerarşide, 1 oyuncusu kök (lider) olacak şekilde sosyal oyuncuların kümesi (düğüm kümesi)  $N = \{1,2, \dots, n\}$ , sonlu bir küme olsun. Kök ve düğüm noktalarında bulunan diğer oyuncular, bir köklü yönlendirilmiş  $T$  ağacı tarafından tanımlanabilir. Köklü yönlendirilmiş bir  $T$  ağacı ile, ayırt edici bir düğümü kök olarak içeren yönlendirilmiş bir graf kastedilir. Graf bulunan bütün düğümler için kökten o düğüme yönlendirilmiş bir tek yol vardır. Şekil 1 de beş oyuncunun yer aldığı böyle bir ağaç gösterilmiştir.

Bir hiyerarşide her oyuncu lideri lider oyuncu ile doğrudan ya da olaylı olarak bir veya daha fazla oyuncunun yardımı içeren bir ilişkiye sahiptir. Bu durumda bir oyuncu için önemli olan grup lider oyuncunun kendisi ve verilen hiyerarşide var olan tüm ara oyuncularından (Akran grup) oluşur. Hiyerarşi lider oyuncu ile diğer oyuncuların farklı bir düğümde bulunduğu bir köklü yönlendirilmiş ağaç ile açıklanabilir. Her oyuncunun akran grubu oyuncuyu lider ile bağlayan yol üzerinde bulunan oyunculara karşılık gelir.

Zincir benzeri hiyerarşiler, graflar veya zincirlerle temsil edilecektir. Bir graf veya zincir ile, düğümleri tek bir yönlendirilmiş yol üzerinde bulunan bir ağacı ifade ederiz.

Akran grup durumlarında,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  oyuncuların kümesi olmak üzere, bu küme üzerinde düğümleri bir yönlü graf olan  $T$  tarafından verilen hiyerarşik bir ilişkiyi ele alırız. Her oyuncu, bir düğümde yer alır ve her düğümden köke doğru tek bir yönlü yol bulunacak şekilde yerleştirilir. Eğer tüm düğümler tek bir yönlü yol üzerinde yer alıyorsa bir zincirimiz vardır, denir.

Her ağaç bağlantılı olduğu akran grubun durumuna ve o grubun oluşturduğu koalisyona ait olan üyelerin bireysel ekonomik olanaklarını birleştirerek tanımlanmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu sayede bir akran grup oyunu oluşturmak mümkündür.

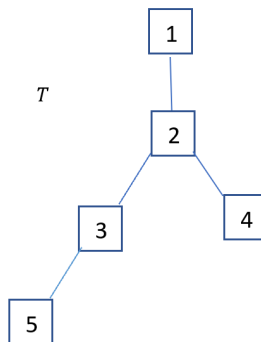
Bireysel özellikler, oyuncuların potansiyel ekonomik olanaklarını tanımlayan bir  $a$  vektörüyle açıklanmaktadır. Burada  $a_i$ , oyuncu  $i$ 'nin lider oyuncusunun onunla işbirliği yaparsa elde edilebilecek kazançtır.

$T$ -bağlantılı akran grup durumu verildiğinde karşılık gelen akran grup oyunu  $\langle N, v \rangle$  olup,  $v(S) = \sum_{i:P(i) \subset S} a_i$ ,  $\forall S \subset N$ ;  $v(\emptyset) = 0$  dır. Eğer  $1 \notin S$  ise  $v(S) = 0$  dır.

Her  $i \in N$  oyuncu için 1'den  $i$  ye bağlı  $T$  nin yolunda tüm oyuncuların oluşturduğu  $N$  nin alt kümesi  $i$  oyuncusunun  $T$ -bağlantılı akran grubu olarak adlandırılır ve  $[1, i]$  ile gösterilir. Eğer  $i$  oyuncusunun akran gruplarının diğer tüm üyeleri  $i$  oyuncusu ile işbirliği içinde ise yalnızca  $i$  oyuncusu etkili olabilir. Akran grup durumları sonucunda modellenen oyunda koalisyonların büyük koalisyonun ( $v(N)$ ) değerinden kazanç sağlaması hedeflenir.

**Örnek 3.1** Şekil 1 de  $T$  ağacına karşılık gelen tüm akran gruplarının kümesi

- $[1,1] = \{1\}$ , 1 den 1 e bağlı  $T$  yolundaki tüm temsilcilerin oluşturduğu küme,
- $[1,2] = \{1,2\}$ , 1 den 2 ye bağlı  $T$  yolundaki tüm temsilcilerin oluşturduğu küme,
- $[1,3] = \{1,2,3\}$ , 1 den 3 e bağlı  $T$  yolundaki tüm temsilcilerin oluşturduğu küme,
- $[1,4] = \{1,2,4\}$ , 1 den 4 e bağlı  $T$  yolundaki tüm temsilcilerin oluşturduğu küme,
- $[1,5] = \{1,2,3,5\}$ , 1 den 5 e bağlı  $T$  yolundaki tüm temsilcilerin oluşturduğu küme,



**Şekil 1.**  $T$  Ağacına ait bir akran grubu durumu örneği

karşılık gelen akran grup oyunu

$$\begin{aligned} v(\{1\}) &= v(\{1, 3\}) = v(\{1, 4\}) = v(\{1, 5\}) = v(\{1, 3, 4\}) = v(\{1, 3, 5\}) = v(\{1, 4, 5\}) = v(\{1, 3, 4, 5\}) \\ &= a_1; \\ v(\{1, 2\}) &= v(\{1, 2, 5\}) = a_1 + a_2; \quad v(\{1, 2, 3\}) = a_1 + a_2 + a_3; \quad v(\{1, 2, 4\}) = v(\{1, 2, 4, 5\}) = a_1 + \\ &a_2 + a_4; \\ v(\{1, 2, 3, 4\}) &= a_1 + a_2 + a_3 + a_4; \quad v(\{1, 2, 3, 5\}) = a_1 + a_2 + a_3 + a_5; \quad v(N) = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5; \end{aligned}$$

aksi takdirde  $v(S) = \mathbf{0}$  ile verilir (Yücesan, (2017); Tijjs, (2003)).

**Örnek 3.2** Koalisyon değerleri,

$v(1) = 25, v(2) = 0, v(3) = 0, v(1,2) = 35, v(1,3) = 25, v(2,3) = 0, v(1,2,3) = 40$  şeklindedir. Bu oyuna ait sırasıyla Shapley değeri, Banzhaf değeri, CIS değeri, ENSC değeri ve ED çözümünü bulalım.

Şimdi marjinal vektörleri tabloda gösterelim:

**Tablo 2.** Marjinal vektörler

$\sigma$	$m_1^\sigma(v)$	$m_2^\sigma(v)$	$m_3^\sigma(v)$
$\sigma_1=(1,2,3)$	25	10	5
$\sigma_2=(1,3,2)$	25	15	0
$\sigma_3=(2,1,3)$	35	0	5
$\sigma_4=(2,3,1)$	40	0	0
$\sigma_5=(3,1,2)$	25	15	0
$\sigma_6=(3,2,1)$	40	0	0

Shapley değeri:

$$\Phi(v) = \frac{1}{3!} \sum_{\sigma \in \pi(3)} m^\sigma(v) = \frac{1}{3!} (85, 20, 5) \text{ olarak bulunur.}$$

Banzhaf değeri:

$$\begin{aligned} \beta_1(v) &= \frac{1}{2^{|N|-1}} \sum_{i \in S} (v(S) - v(S \setminus \{i\})) \\ \beta_1(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{1 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{1\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(1) + v(12) - v(2) + v(13) - v(3) + v(123) - v(23)) \\ &= \frac{125}{4} \\ \beta_2(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{2 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{2\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(2) + v(12) - v(1) + v(23) - v(3) + v(123) - v(13)) \\ &= \frac{25}{4} \\ \beta_3(v) &= \frac{1}{2^2} \sum_{3 \in S} (v(S) - v(S \setminus \{3\})) \\ &= \frac{1}{2^2} (v(3) + v(13) - v(1) + v(23) - v(2) + v(123) - v(12)) \\ &= \frac{5}{4} \end{aligned}$$

$$\beta(v) = \left( \frac{125}{4}, \frac{25}{4}, \frac{5}{4} \right) \text{ olarak bulunur.}$$

CIS değeri:



$$\begin{aligned}
CIS_i(v) &= v(\{i\}) + \frac{1}{|N|} (v(N) - \sum_{j \in N} v(\{j\})) \\
CIS_1(v) &= v(1) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\
&= 30 \\
CIS_2(v) &= v(2) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\
&= 5 \\
CIS_3(v) &= v(3) + \frac{1}{3} (v(123) - (v(1) + v(2) + v(3))) \\
&= 5
\end{aligned}$$

$CIS(v)=(30,5,5)$  olarak bulunur.

$ENSC$  değerini hesaplayalım:

$$\begin{aligned}
ENSC_i(v) &= -v(N \setminus \{i\}) + \frac{1}{|N|} (v(N) + \sum_{j \in N} v(N \setminus \{j\})) \\
ENSC_1(v) &= -v(23) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23)) \\
&= \frac{100}{3} \\
ENSC_2(v) &= -v(13) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23)) \\
&= \frac{25}{3} \\
ENSC_3(v) &= -v(12) + \frac{1}{3} (v(123) + v(12) + v(13) + v(23)) \\
&= -\frac{5}{3}
\end{aligned}$$

$ENSC(v)=(\frac{100}{3}, \frac{25}{3}, -\frac{5}{3})$  olarak bulunur.

$ED$  çözümü;

$$\begin{aligned}
ED_i(v) &= \frac{1}{|N|} v(N) \\
ED_1(v) &= \frac{1}{3} v(123) = \frac{40}{3} \\
ED_2(v) &= \frac{1}{3} v(123) = \frac{40}{3} \\
ED_3(v) &= \frac{1}{3} v(123) = \frac{40}{3} \text{ olup}
\end{aligned}$$

$ED(v) = (\frac{40}{3}, \frac{40}{3}, \frac{40}{3})$  olarak bulunur.

**Tablo 3.** Akran Grup Durumlarının Oyun Teorisi Modellenmesi ile İlgili Çözümler

Çözümler	Oyuncu 1	Oyuncu 2	Oyuncu 3	Vektörel Gösterim
<b>Shapley değeri</b>	$\frac{85}{3}$	$\frac{20}{3}$	$\frac{5}{3}$	(28.333,6.666,1.666)
<b>Banzhaf değeri</b>	$\frac{125}{4}$	$\frac{25}{4}$	$\frac{5}{4}$	(31.25,6.25,1.25)
<b>CIS-değeri</b>	30	5	5	(30,5,5)
<b>ENSC-değeri</b>	$\frac{100}{3}$	$\frac{25}{3}$	$-\frac{5}{3}$	(33.333,8.333, -1.666)
<b>ED-çözümü</b>	$\frac{40}{3}$	$\frac{40}{3}$	$\frac{40}{3}$	(13.333,13.333,13.333)

Tablo 3 incelendiğinde 1. Oyuncu için en iyi kazanç ENSC değeri, 2. Oyuncu ve 3. Oyuncu için ise ED değeri ile elde edilir. Mevcut koşullar gereği ED çözümü adaletli sağlamadığından tercih edilmeyecektir. ENSC değeri ise 3. Oyuncuya maliyet çıkaracağından tercih edilmeyecektir. Sonuç olarak oyuncuların adeti sağlayan Shapley, Banzhaf veya CIS arasından tercih yapması beklenir.

#### 4. Akran Grup Durumları ile İlişkili Ekonomik ve Yöneylem Araştırması Durumları

Bu bölümde akran grup durumlarının bazı uygulamaları olan ihale durumları, sıralama durumları ve havaalanı durumları ele alınacaktır (Branzei vd., 2010).

##### 4.1 İhale Durumları

Gizli teklif ikinci fiyat ihale durumlarında (Rasmusen, 1989) ihaleye giren ve bir rezervasyon fiyatına sahip nesneyi en düşük fiyatla satın almak isteyen bir  $r$  satıcısı vardır. Bir zarfta  $b_1, b_2, \dots, b_n$  tekliflerinin her birini veren  $1, 2, \dots, n$  şeklinde  $n$  tane satıcı (oyuncu) olduğunu kabul edelim. Zarflar açıldıktan sonra en yüksek teklifi veren teklifçi, ikinci en yüksek teklifin fiyatındaki nesneyi alır.  $\omega_i$ , diğer oyuncular tarafından bilinmesi gerekmeyen nesnenin  $i$  oyuncusu için değeri olsun.

$$\omega_1 > \omega_2 > \dots > \omega_n \geq r$$

olduğu kabul edilsin. Eğer  $i$  oyuncusu yalnız başına davranırsa kendi değerini teklif ederken onun için optimal olduğu dikkate alınmalıdır. Bu durumda  $b_i = \omega_i$  dir. Bu, eğer  $i \neq 1$  ise  $v(\{i\}) = 0$  ve 1 oyuncusu için  $v(\{1\}) = \omega_1 - \omega_2$  ödemesine sebep olur. Çünkü 1 oyuncusu  $\omega_2$  fiyatı için nesneyi elde eder. Eğer  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  deki tüm oyuncular işbirliğine karar verirlerse, bir baskın strateji; 1 oyuncusu  $b_1 = \omega_1$  ve diğerleri  $r$  yi teklif etmektedir. Böylece eğer  $i \in N \setminus \{1\}$  ise  $b_i = r$  dir. O zaman amaç  $r$  fiyatında 1 oyuncuya gitmek ve  $N$  ye  $v(N) = \omega_1 - r$  ödemek anlamına gelmektedir. Eğer  $S \neq N$  koalisyonu (gizli veya değil) birlikte çalışırsa, onlar en yüksek değere sahip  $S$  deki oyuncuyu ortaya çıkarırlar. Eğer bu  $i(S)$  oyuncu ise o  $\omega_{i(S)}$  yi teklif eder ve diğerleri  $r$  yi teklif eder. Bu  $S$  için bir baskın teklif stratejisidir. Ayrıca  $N \setminus S$  de diğer oyuncuların (ve gruplar) da baskın teklif stratejisi oynadığı kabul edilirse iki durum düşünülebilir.

**Durum 1.** 1 oyuncusu  $S$  de değildir. Böylece  $i(S) \neq 1$  dir. O zaman nesne,  $N \setminus S$  de oyuncu 1 (ya da 1 in ait olduğu grup) e gider.  $S$  nin  $v(S)$  değeri 0 durumundadır.

**Durum 2.** 1 oyuncusu,  $S$  dedir. O zaman en yüksek teklifi  $\omega_1$  dir ve eğer  $[1, k] \subset S$  ve  $k + 1 \notin S$  ise ikinci en yüksek teklif  $\omega_{k+1}$  dir ( $i = 2, \dots, k$  için  $b_i = r$ ). Bu durumda  $S$  koalisyonunun değeri  $v(S) = \omega_1 - \omega_{k+1}$  dir. Çünkü 1 oyuncusu  $\omega_{k+1}$  fiyatındaki nesneyi alır.

**Örnek 4.1** Bir gizli teklif ikinci fiyat ihalesinde nesne için sırasıyla 100,80,50 değerleri ile üç teklifin var olduğu ve rezervasyon ücretinin de 25 olduğu kabul edilsin. O zaman karşılık gelen akran grup oyunu,

$$\begin{aligned} v &= (\omega_1 - \omega_2)u_{\{1,1\}} + (\omega_2 - \omega_3)u_{\{1,2\}} + (\omega_3 - \omega_4)u_{\{1,3\}} \\ &= (100 - 80)u_{\{1,1\}} + (80 - 50)u_{\{1,2\}} + (50 - 25)u_{\{1,3\}} \\ &= 20u_{\{1\}} + 30u_{\{1,2\}} + 25u_{\{1,2,3\}} \end{aligned}$$

eşittir. Eğer bütün teklif sahipleri beraber çalışırsa, 1. teklifçi 100 teklif eder, 2. ve 3. teklifçiler 25 teklif eder. Böylece nesne, 25 ödeyen, 1. oyuncuya gider.

##### 4.2. Sıralama Durumları

Bir sıralama durumu (Curiel vd., 1989),  $(\sigma_0, p, \alpha_i)$  şeklinde bir üçlüdür. Burada  $\sigma_0$ , başlangıçta verilen sıralama  $p_i > 0$  ile  $p = (p_i)_{i \in N}$ ,  $i$  müşterisinin işi bitirmesi için gerek duyduğu zaman ve  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  hizmet bekleyen müşterilerin kümesidir.  $\alpha = (\alpha_i)_{i \in N} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  dir ve burada  $\alpha_i$ ,  $i$  için birim zaman başına düşen maliyettir.  $i$  nin aciliyet indeksi  $u_i = p_i^{-1} \alpha_i$  ile verilir. Müşterileri onların acilliğine göre sıralamak en uygun olandır (Smith, 1956) ve bu düzenleme, komşular arasında gerçekleşir. Karşılık gelen maliyet tasarruf oyunu, komşuların

$$v = \sum_{(k,l), k < l} g_{k,l} u_{[k,l]}$$

değişimi üzerinde oybirliği oyunlarının bir negatif olmayan kombinasyonudur. Burada

$$g_{k,l} = (p_k \alpha_1 - p_1 \alpha_k)_+$$

yani,

$$g_{k,l} = \max\{0, p_k \alpha_1 - p_1 \alpha_k\}$$

dır.

Ayrıca bazı sıralama durumları akran grup oyunlarına yol açar.  $n$  müşterinin  $\sigma_0 = (1, 2, \dots, n)$  ilk siparişinde özel sıralama durumları, zorunlu indeksler arasında

$$u_2 > u_3 > \dots > u_n \quad (5.1)$$

ilişkileri olacak şekilde düşünülecek. (5.1)' in sağlandığı durumda, en uygun sipariş yalnızca **1** ve bazı diğer müşteriler arasındaki komşu anahtarlar tarafından elde edilir; Bu  $k \neq 1$  ile tüm  $g_{k,l}$  sıfır olduğu anlamına gelir.

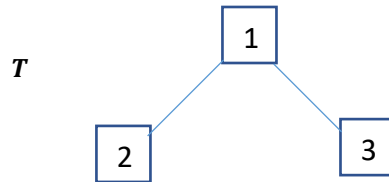
Böylece, düşünülen sıralama durumları

$$v = \sum_{i=2}^n g_{1,i} u_{[1,i]}$$

formunda akran grupları meydana getirir. Burada  $g_{1,i} = (p_1 \alpha_i - p_i \alpha_1)_+$  dir.

Böyle bir akran grup oyunu,  $T$ -bağlantılı akran grubu durumu  $\langle N, P, \alpha \rangle$  ya karşılık gelir. Öyle ki  $T$ , sıralama durumundaki başlangıç siparişine karşılık gelen  $(1, 2), (2, 3), \dots, (n-1, n)$  yayları ile çizgi-grafigidir ve burada, her  $i \in N$  için  $\alpha_i = g_{1,i}$  ve  $\alpha_1 = 0$  dir.

**Örnek 4.2**  $N = \{1, 2, 3\}$ ,  $\sigma_0 = (1, 2, 3)$ ,  $p = (2, 3, 4)$  ve  $\alpha = (20, 60, 100)$  olacak şekildeki sıralama oyununa karşılık gelen akran grup oyununu Şekil 2 deki  $T$  ağacına göre bulalım.



Şekil 2. Örnek 5.2 ye ait  $T$  ağacı

$$v = g_{1,2} u_{[1,2]} + g_{1,3} u_{[1,3]}$$

$$= g_{1,2} u_{[1,2]} + g_{1,3} u_{[1,3]} \text{ dir.}$$

Aciliyet sırası  $u_1 = 10$ ,  $u_2 = 20$ ,  $u_3 = 25$  olduğundan  $(3, 2, 1)$  şeklindedir.

$$g_{1,2} = \max\{0, p_1 \alpha_2 - p_2 \alpha_1\} = 60$$

$$g_{1,3} = \max\{0, p_1 \alpha_3 - p_3 \alpha_1\} = 120$$

$$g_{2,3} = 0$$

Buna göre akran grup oyunu

$$v = 60u_{[1,2]} + 120u_{[1,3]} \text{ dir.}$$

### 4.3 Havaalanı Durumları

Farklı uçak türleri için iniş ücreti (landing fee) problemleri havaalanı oyunları olarak adlandırılan işbirlikçi oyunların bir ilginç sınıfını ortaya çıkarır (Littlechild ve Tompson 1977. Oyuncuların uçakları  $1, 2, \dots, n$ ,  $l_1 > l_2 > \dots > l_n$  ile  $l_1, l_2, \dots, l_n$  uzunluklu iniş pistine ihtiyaçlarının var ve ilgili maliyetlerin  $c_1 > c_2 > \dots > c_n$  olduğu kabul edilsin.

Karşılık gelen havaalanı oyunu  $\langle N, c \rangle$

$$c = c_n u_N^* + (c_{n-1} - c_n) u_{N \setminus \{n\}}^* + \dots + (c_1 - c_2) u_{\{1\}}^*$$

ile verilsin. Burada  $\langle N, u_S^* \rangle$ , eğer  $S \cap T \neq \emptyset$  ise  $u_S^*(T) = 1$  ve diğer durumlarda ise  $u_S^*(T) = 0$  olan bir oyundur.

Bu oyunun Shapley değeri iniş ücret problemlerini çözmek için idealdir.

$\langle N, c \rangle$  ye karşılık gelen  $\langle N, c^* \rangle$  dual oyunu, her  $S \subset N$  için  $c^*(S) = c(N) - c(N \setminus S)$  ile verilir.

$$c^*(S) = c_n u_N + \sum_{i=1}^{n-1} (c_i - c_{i+1}) u_{\{1,2,\dots,i\}}$$

açıkça bir akran grup oyunudur.

**Örnek 4.3** Üç hava yolu şirketinin uçaklarını indireceği alanlara 200, 100, 50 TL ödeme yapıldığını kabul edilsin.

Havaalanı oyununa karşılık gelen akran grup oyunu

$$\begin{aligned} c^* &= c_3 u_N + (c_1 - c_2) u_{\{1\}} + (c_2 - c_3) u_{\{1,2\}} \\ &= 50 u_N + 100 u_{\{1\}} + 50 u_{\{1,2\}} \end{aligned}$$

şeklinde dir.

## 5. Sonuç

Çalışmamızda, her bir ağaç bağlantılı akran grup durumu için bir işbirlikçi model ve koalisyon içindeki akran gruplarına ait üyelerin bireysel ekonomik olasılıklarının paylaşılmasıyla tanımlanan karakteristik fonksiyonlar üzerinde durulmaktadır. Akran grupları, oyuncuların birleştirilerek ilgili oyuna ait oyuncular oluşturulmasıyla ele alınmıştır.

Ayrıca, işbirlikçi Oyun Teorisi kullanılarak akran grubu durumu akran grupları oyunu olarak modellenmiştir. Oyunun kurulmasının ardından, Shapley değeri, Banzhaf değeri, CIS değeri, ENSC değeri ve ED çözümü gibi çeşitli çözüm yöntemleri önerilmiştir.

Daha fazla araştırma için, işbirlikçi oyunlar kullanılarak bazı yöneylem araştırması durumlarının genişletilebileceği belirtilmiştir. Bu durumlar makalede ele alınmış ve çeşitli örneklerle açıklanmıştır.

Ülkemizde, akran grup oyunlarını konu alan yeterli sayıda çalışma olmamakla birlikte, bu konu hala açık bir araştırma alanıdır. Bu nedenle, gelecekte akran grupları ve oyun teorisiyle ilgili farklı konularda çeşitli çalışmalar yapılması önerilmektedir. Yöneylem araştırması durumları ve ekonomik durumlardan olan ihale durumları, sıralama durumları ve havaalanı durumları gibi senaryoların işbirlikçi oyun teorisi ile modellenmesi, akran grup oyunlarının geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir. Bu tür modellerin kullanılmasıyla yapılacak çalışmalar, ilgili literatüre değerli katkılar sunabilir.

### Araştırmacıların Katkısı

Araştırmanın yazarları araştırmanın tüm süreçlerine eşit derecede katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Alparslan Gök, S.Z., Palancı, O., Yücesan, Z., (2018). Handbook of Research on Emergent Applications of Optimization Algorithms, IGI Global. Doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-2990-3>

Banzhaf, J.F., (1965). Weighted Voting Doesn.t Work: A Mathematical Analysis. Rutgers University Law Review, 19, 317-343. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01194250>

Branzei, R., Dimitrov, D., Tijs, S., (2008). Models in Cooperative Game Theory. Springer-Verlag, 204p, Berlin. Erişim adresi: <https://research.tilburguniversity.edu/en/publications/models-in-cooperative-game-theory-2>

Brânzei, R., Fragnelli, V., Tijs, S. (2002). Tree-connected peer group situations and peer group games. Mathematical Methods of Operations Research, 55, 93-106. Doi: <https://doi.org/10.1007/s001860200176>

Branzei, R., Mallozzi, L., Tijs, S., (2010). Peer Group Situations and Games with Interval Uncertainty. International Journal of Mathematics, Game Theory, and Algebra, 19(5-6), 381–388. Erişim adresi: <https://www.iris.unina.it/handle/11588/599668>

Branzei, R., Tijs, S., Alparslan Gök, S.Z., (2010.) How to handle interval solutions for cooperative interval games. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 18(2); 123. <https://doi.org/10.1142/S0218488510006441>

Curiel, I. (1997). Cooperative Game Theory and Applications. Springer-Verlag, 194p, USA. Erişim adresi: <https://books.google.com.tr>

Curiel, I., Pederzoli, G., Tijs, S., (1989). Sequencing games. Eur. J. Op. Res., (40), 344. Erişim adresi: [https://pure.uvt.nl/ws/portalfiles/portal/659469/27020\\_12973](https://pure.uvt.nl/ws/portalfiles/portal/659469/27020_12973).

Deng, X., Papadimitriou, C. H. (1994). On the complexity of cooperative solution concepts. Mathematics of operations research, 19(2), 257-266. doi: <https://doi.org/10.1287/moor.19.2.25>

Driessen, T.S.H., Funaki, Y., (1991). Coincidence of and collinearity between game-theoretic solutions. OR Spectrum, 13(1), 15-30. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01719767>

Gilles, R. P., Owen, G., van den Brink, R. (1992). Games with permission structures: the conjunctive approach. International Journal of Game Theory, 20(3), 277-293. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01253782>

Littlechild, S. C., Owen, G. (1976). A further note on the nucleous of the “airport game”. International Journal of Game Theory, 5, 91-95. Erişim adresi: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01753311>

Myerson, R. B. (1977). Graphs and cooperation in games. Mathematics of operations research, 2(3), 225-229. <https://doi.org/10.1287/moor.2.3.225>

Owen, G. (1986). Values of graph-restricted games. SIAM Journal on Algebraic Discrete Methods, 7(2), 210-220. doi: <https://doi.org/10.1137/0607025>

Rasmusen, E. (1989). Games and information. An introduction to game theory. Blackwell, Oxford UK & Cambridge USA. Erişim adresi: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/48245/1/12.pdf>

Shapley, L. S. (1953). A Value for n-Person Games: Annals of Math. Studies, (28), 307-317. Erişim adresi: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2021/P295.pdf>

Smith, W. E. (1956). Various optimizers for single-stage production, Naval Res. Logist. Quart. (3), 59-66. Erişim adresi: <https://books.google.com.tr>

Tijs, S. (2003). Introduction to game theory. Springer. Hindustan Book Agency, India. Erişim adresi: <https://eclass.unipi.gr/modules/document/file.php/DES101/Βιβλίο%20μαθήματος%20%28Αγγλική%20δωρεάν%20έκδοση%29/%40An%20Introduction>

von Neumann, J., Morgenstern, O., (1947). Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press, 776p, Princeton. Erişim adresi: <https://psycnet.apa.org/record/1947-03159-000>

Yücesan, Z. (2017). Akran grup oyunlarının gri sistem teorisi ile modellenmesi (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü), Süleyman Demirel Üniversitesi. Isparta. Erişim adresi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/276987>



# Journal of Turkish Operations Management

## Talebe dayalı malzeme ihtiyaç planlamaya dönüşüm süreci: Bir hazır giyim firmasında uygulama

Utkan Uluçay<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Maltepe Üniversitesi, Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi, İstanbul,

Utkan.ulucay@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8182-9093>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 22.12.2022

Revize: 06.09.2023

Kabul: 14.09.2023

#### Anahtar Kelimeler:

Talebe Duyarlı Malzeme İhtiyaç Planlaması,  
DDMRP,  
Dinamik Stok Yönetimi,  
Bulunurluk,  
Kısıtlar Teorisi

### Özet

Belirsizliğin arttığı bugünün çalışma ortamında perakendecilerin doğru stokları doğru yerde ve doğru miktarda tutmaları önem kazanmıştır. Doğrusal yöntemlerin değişkenliğe dayanıksızlığı ve tahmin hataları stok yönetimini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada Hazır Giyim firmalarına talebe dayalı çekme tipi üretim yönetimine dönüşüm için yol haritası önerilmektedir. Talebe Dayalı Malzeme İhtiyaç Planlama (Demand Driven Material Requirement Planning-DDMRP) uygulamasıyla merkez depodan mağazalara gün aşırı döngüsel sefer (milk-run) tarzında tamamlama servisi verilmiştir. Aynı zamanda fabrikanın üretim iş emirleri merkez depodaki DDMRP uygulamasına göre düzenlenmiştir. Geleneksel perakende dağıtım satış tahmini, min-maks stok seviyelerine göre otomatik tamamlama ve birim maliyet düşürme amacıyla satınalma-üretim-sevk için parti büyüme esaslıdır. Gelenekselin aksine ürün aileleri bazında yıllık eğilim dışında satış tahmini ve optimizasyon kullanılmadan dinamik stok yönetimi uygulanarak bir yıl içinde üretimdeki akış süresi %33 azaltılmış, yarı mamul stoklar %37 düşürülmüş, mamul stoklarda %17 azalma ve satışlarda %20 artış elde edilmiştir.

## Transformation to Demand Driven MRP – pull type production management: Implementation in a clothing company

### Article Info

#### Article History:

Received: 22.12.2023

Revised: 06.09.2023

Accepted: 14.09.2023

#### Keywords:

Demand Driven MRP,  
DDMRP,  
Dynamic Inventory Management,  
Availability,  
Theory of Constraints

### Abstract

In today's VUCA environment availability is the major issue for Retailers. The fragility of linear methods under volatility and remarkable forecast errors are major challenges. The traditional method relies on sales forecasting and larger batches to reduce unit cost and min-max for replenishment. This study proposes a roadmap for the transformation to demand-driven pull-type production management for retailers. The retailer issued work orders and organized frequent deliveries by Demand Driven Material Requirement Planning (DDMRP). During the same year, flow time was reduced by 33%, WIP dropped by 37%, finished goods inventory dropped by 17% and sales increased by 20%.

## 1. Giriş

Şirket performansı değerlendirilirken bulunurluk oranı, fazla mesailer, akış süresi, stok seviyesi, üretim miktarı gibi operasyonel başarı kriterleri dikkate alınmaktadır. Genel bakış maliyeti düşürmektir; satış tahmini, optimizasyon, min-maks gibi geleneksel Endüstri Mühendisliği yaklaşımı hakimdir. Ancak Oynak (Volatile)-Belirsiz (Uncertain)- Karmaşık (Complex)- Muğlak (Ambiguous) (VUCA) olarak ifade edilen bugünün belirsiz ve etkileşimli dünyasında piyasa ve operasyonların aşırı değişkenliği bu çabaların sonuçlarını sınırlandırmaktadır. VUCA ortamında geçmiş, geleceği temsilde yetersiz kalmaktadır ve tahmin sistemlerini besleyecek yeterli ölçüde veri bulmak zorlaşmıştır. Dolayısıyla Tedarikçi Yönetimli Stok politikaları gündemdedir (Xu, Zhang, ve Cui, 2022). Belirsizliği aşmak üzere daha kapsamlı metodlar denenmiştir (Margherita, Banchi, Biffi, di Castri, ve Morelli, 2022). En kötü senaryoya göre çalışan optimizasyon modelleri tartışılmıştır (Thorsen ve Yao, 2017). Doğru stratejileri belirlemek üzere VUCA seviyesinin ölçümüne dair çalışmalar yapılmıştır (Fridgeirsson, Ingason, Jonasson, ve Kristjansdottir, 2021).

Uygulama yapılan firmada geleneksel tarzda çalışırken VUCA ortam etkisiyle zorluk yaşanmıştır. Yoğun fazla mesai, siparişlerin gecikmesi, stok seviyesinin yüksekliğine paralel nakit akışı zorlukları görülmüştür. Genel stok miktarı yüksek olduğu halde bazı ürünlerde yetersiz stok, bazı ürünlerde aşırı stok vardır. Yetersiz stok olan ürünler işletmede fazla mesailere sebep olmaktadır. Başka bir ifadeyle “bulunurluk” problemi vardır. VUCA bulanıklığında bulunurluk problemini çözebilmek ancak firmaların kendileri için değil, tedarik zinciri için en iyi olanı yapması halinde mümkündür (Georgiadis ve Rajaram, 2013). Talep ve tedarikteki belirsizlikler parti büyüklüğü, tamamlama ve çok seviyeli kurguyu etkilemektedir (Wen, Choi, ve Chung, 2018). Belirsizlik ortamındaki tahmin sistemleri beklenen etkiyi veremediğinde bunun sonuçları parti büyüklüğü ile tedarik zinciri kurgusunda görülecektir (Choi, Govindan, ve Li, 2017). VUCA şartlarında doğrusallık yoktur, bulunurluk için hızlı tepki, proaktif yaklaşım ve sebep-sonuç ilişkili tedarik zinciri kurgusu gerekmektedir (Grzybowska ve A. Tubis, 2022).

Sebep-sonuç ilişkili yaklaşımla bulunurluk problemini inceleyen Kısıtlar Teorisinde (Theory Of Constraints-TOC) geleneksel yaklaşım sezgiseldir, uygulaması daha pratiktir, rutin ürünleri otomatik tamamlar ancak bunun dışındaki satış faaliyetlerinin ayrıca düzenlenmesi gerekir, mevcut bilgi sistemlerine yama olarak eklenen küçük-büyük her ölçek için yazılımlar vardır. Bulunurluk için yapılan başarılı uygulamalar arasında uluslararası büyük bir hazır giyim perakendecisinde yöneticilerin sebep sonuç ilişkisi kurarak sonuca gidişi (Goldratt ve Goldratt-Ashlag, 2008), Hindistan’da FMCG perakendecisinde Kısıtlar Teorisi Tamamlama Çözümünün tedarik zinciri boyunca uygulanışı (Goldratt ve Goldratt-Ashlag, 2008), ev tekstili alanında ulusal bir zincir mağazasının dönüşüm sürecinde stok yönetimi (Goldratt E. M., 2009) sayılabilir.

Kısıtlar Teorisindeki modern yaklaşım DDMRP’ dir. MRP ile uyumludur, tahmin içerir, ayrışma noktaları vardır, dinamik stok yönetimidir, promosyon-yeni ürün girişi-ürün çıkışı-mevsimlik hareketler gibi alışılmış çalışma rutinine paraleldir, büyük ölçekler için yazılımlar vardır (Ptak ve Smith, 2016). Ekonomik Sipariş Miktarı ve min-maks kurallarıyla DDMRP uygulamasını ideal (değişkenlik olmayan) ve gerçek hayat (ürün gruplarına göre farklı değişkenlikler olan) şartlarında gösteren simülatör Goldratt Research Labs tarafından geliştirilmiştir (Goldratt-Research-Labs, 2022).

Bu çalışmanın ikinci bölümünde yazın taramasıyla problemin bilinirliği vurgulanacak, üçüncü bölümünde Kısıtlar Teorisi uyarınca izlenen yöntem gösterilecek, dördüncü bölümünde mevcut durum değerlendirmesi, kök sebep belirlenmesi ve çözüm için DDMRP uygulaması açıklanacaktır. Beşinci bölümde bir yıl zarfında elde edilen sonuçlar ve öneriler paylaşılacaktır.

## 2. Yazın Taraması

Geleneksel tahmin, min-maks, ekonomik sipariş miktarı yöntemleri bugünün VUCA ortamında beklenen performansı verememektedir. VUCA ortamı doğrusal olmayan tabiatı nedeniyle doğrusal tekniklerin kullanımını zorlaştırmaktadır (Xu ve diğ., 2022). Şartlar hızla değişirken süreç yerine sebep-sonuç ilişkileriyle kök sebep bulunarak sistem “anlaşılabilir” seviyeye indirgenebilir (Grzybowska ve A. Tubis, 2022). Zincirdeki firmaların kendileri için değil, zincir için iyi olanı yapmaları halinde bulunurluk sağlamaları mümkündür (Georgiadis ve Rajaram, 2013).

Tahmin hataları VUCA ortamında artacaktır ve bu hatalar parti büyüklüğünü etkileyebilecektir (Choi ve diğ., 2017). Bu hataların zincirde kamçı etkisi yaratması söz konusudur (Wu ve Tsai, 2008). Dolayısıyla bulunurluk için önemli bir değişken olan parti büyüklüğü marifetiyle tedarik zinciri kurgusu ve sevkiyat sıklıkları ayarlanabilir (Wen, Choi, ve Chung, 2018). Tedarik Zinciri bir bütün olarak sistematik (holistik) değerlendirildiğinde işbirliğini iyileştirmek üzere Tedarikçi Yönetimli Stok (Vendor Managed Inventory-VMI) anlayışı öne çıkmaktadır (Disney ve Towill, 2003).



İşbirliğini zorlaştıran konu çeviklik-maliyet ikilemidir, VUCA belirsizliğinde yalın üretim teknikleri tek başına yeterli değildir, ikilem parti büyüklüğü noktasında Kısıtlar Teorisi anlayışıyla çözülebilir (Stratton ve Warburton, 2003). Hindistan’da büyük ölçekli bir üretim-dağıtım firmasının tedarik zinciri 7 yıl içinde dönüşümü başarmıştır (Modi, Lowalekar, ve Bhatta, 2018).

Özetlenecek olursa firmaların lokal değil, holistik anlayışla zincirin tamamı için iyi olanı yapması gerekmektedir. Bunun için işbirliği gereklidir. Tedarikçi Yönetimli Stok işbirliğini sağlayabilir. VUCA ortamı son müşterinin talebini ve zincir boyunca tedariki dalgalandırdığı ve zincir içindeki firmalar arasında karşılıklı güveni sağlamak zor olduğu için kolay bir çözüm yoktur.

VUCA ortamının belirsizliği, hızlı tepki ihtiyacı, yalınla birlikte küçük partiler için esnek üretim, sade – anlaşılabilir – kolay uygulanabilir – hızlı ve iyi sonuç alabilecek bir metodoloji gerekmektedir. Tedarik Zincirinin tipik problemi her gün hangi üründen hangi mağazaya kaç adet sevk edileceğidir. Üretim olan firmalarda bunun peşinden her gün üretime hangi üründen kaç adet iş emri verileceği gelmektedir.

### 3. Çözüm Yöntemi

Kısıtlar Teorisi değişim yönetimini Düşünme Süreçleri (Thinking Process - TP) başlığında derlemektedir (Dettmer, 2007). Bu çerçevede “neyi değiştiriyoruz?” sorusunu cevaplamak üzere sebep-sonuç temelli Mevcut Durum Ağacı (Current Reality Tree - CRT) kullanılarak kök sebep belirlenmektedir. Daha sonra kök sebebe neden olan çatışmanın çözümü ve “neyle değiştiriyoruz?” sorusunun cevabı için sebep-sonuç temelli ve varsayımları sorgulayan Çözüm Bulutu (Conflict Resolution Diagram -CRD) tekniği uygulanmaktadır. Düşünme Süreçleri içerisinde bu çalışmada yer verilmeyen ancak planlanan geleceğe doğru ilerlerken yaşanacak olayları öngörerek “nasıl değiştiriyoruz?” sorusunu cevaplamak üzere sebep-sonuç temelli Gelecek Durum Ağacı (Future Reality Tree - FRT), Değişim Ağacı (Transition Tree - TT), olası sakıncalar için önlem planlanan Risk Dalları (Negative Branches - NBR) gibi uygulamalar vardır (Dettmer, 2007). Sürecin ana hatları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Sürecin akış şeması

## 4. Bulgular

### 4.1. Mevcut durum analizi

Uygulama yapılan firmanın temel bilgileri yerine, gerçeği yansıtan temsili veriler kullanılmıştır. Firma üreticidir, kendi markası altında mağazaları vardır, toptancılara, perakendecilere ve zincir mağazalara dağıtım yapmaktadır. Satışlar konsinye (ücretsiz verilen ve satıldığı zaman tahsil edilen ürün yönetimi) ve kesin satış (ücreti alınan ve satılmadığında iade kabul edilmeyen ürün yönetimi) olarak iki tiptedir. Fabrikaya yakın konumlu ana depo vardır. Satınalmalar yurtiçi ve yurtdışı malzemeleri içermektedir. Çamaşır, mayo ve ihracat olmak üzere üç temel ürün grubu vardır.

Çamaşırlarda her sezon hareket göre sürekli modeller vardır. Mevsimlik dalgalanmalar sütüyenlerde yoktur ancak diğer çamaşırlarda vardır. Bu grupta yüksek sezonda ürün bulamama riskinden kaçınmak amacıyla müşteriler sezon öncesinde daha büyük miktarlarda ürün almak istemektedirler. Fason üretim sütüyenlerde söz konusu değildir ancak diğer çamaşırlarda yapılabilmektedir. Firmanın tasarım ekibi vardır ve belirli bir plana bağlı olmaksızın sürekli yeni ürün çıkarılmaktadır. Müşteriler termin kabul etmemekte ve derhal teslim istemektedirler. Firmanın ana üretim prensibi stoka üretimdir (MTS: Make-To-Stock). Ürün-renk detayı içeren excel tablolarla doğrusal modellerde satış tahmini yapılmakta ve her üç aylık dönemde güncellenmektedir.

Mayo grubu ürünlerde sezon Mayıs-Haziran aylarında açılmakta ve tüm modellerin planlanan adetlerle hazır olması istenmektedir. Tamamına yakını konsinye satılmaktadır, iadeler belirlenen kurallara göre kabul edilmektedir. İadeler Eylül-Aralık döneminde tamamlanmaktadır. İthal malzeme içeren ürünler için akış süresi uzundur. Model çeşitliliği yüksektir, sipariş adetleri düşüktür, tekrarlı sipariş nadirdir, siparişe üretimdir (MTO: Make-To-Order). Koleksiyon çizelgesine uyum oranı düşüktür.

İhracat grubu tipik siparişe üretimdir (Make-To-Order). Genellikle mayo ürünleridir. Sezonluktur ve koleksiyonun aksine her siparişin farklı termini vardır. Gününde teslim müşteriler için kritiktir. İhracatın müşteri temsilcisi, planlama ekipleri ayrıdır ancak üretim fabrikadaki mevcut bantlarda yapılır. Sosyal uygunluk müşteri şartıdır ve bu nedenle fason kullanımı azdır. Tahminlenmesi neredeyse mümkün değildir.

Ürün reçetelerine göre ihtiyaçlar planlamada belirlenmekte ve satınalmaya sipariş edilmektedir. Planlama aynı zamanda standart maliyetleri hesaplamakta ve iş emirlerini açmaktadır. İthal malzemeler satış tahminlerine göre satın alınmaktadır. Satış tahminlerinde hacmi düşük olan modeller için altı aylık veya yıllık planlama yapılmaktadır. Çok satan modellerde yıllık ortalama satış tahminine göre iş emirleri toplu olarak önceden verilmektedir. Çok malzemeli ürünler için iş emri hazırlığının uzun sürmesi, çok sayıda model olması ve kısıtlı planlama kapasitesi nedeniyle büyük adetli iş emri verilmektedir. Birim maliyeti düşürmek amacıyla satın alırken de büyük partilerle sipariş verilmektedir. Standart maliyet hesaplamalarında birim maliyet kullanılmakta, ürünün dakikasına göre direk işçilik yazılmakta, ürünün dakikasına göre endirek giderler dağıtılmaktadır. Bir yıllık dönemde üretim kapasitesi planlanan satıştan daha fazladır, dolayısıyla uygun miktarda iş emri verildiğinde iş takibi yapılmasına gerek yoktur. Sipariş ve iş emirlerinde öncelik sırası satışın ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. Satış ve üretim arasında öncelikler konusunda sürekli gerginlik yaşanmaktadır. Üretimde sürekli ve düzenli fazla mesai yapılmaktadır. Satış ve Operasyon Planlama toplantıları yapılandırılmamıştır, etkin değildir.

Satışlar bölge bazında toptancı ağırlıklıdır. Toptancılar stok seviyelerini azaltmak istemektedir. Ayda bir sefer ve tam yüklü sevkiyat talep etmektedirler. Kredi limitlerini açık tutabilmek amacıyla satışını garanti gördükleri ürünleri seçmekte ve yeni koleksiyona mesafeli durmaktadırlar.

Mağazalar ana depodan talep ederek ürün çekmekte ancak kimi zaman tam istedikleri ürünü bulamadıkları için mağazanın satışa ayrılan alanından bir miktarını daha depo gibi kullanmaktadırlar. Ana depodan mağazalara sevkiyatlar firma aracılığıyla bir sıra dahilinde yapılmaktadır.

Perakendecilerin toptancılarla çalışması beklenmektedir ancak bazıları doğrudan firmayla çalışmaktadır. Perakendeciler de satışını garanti gördükleri ürünlerle sınırlı kalmak istemektedirler. Yıl boyunca verdikleri siparişlerin tam adedi karşılanmadığı için ihtiyaçtan fazlasını sipariş etmek zorunda kalmaktadırlar.

Yönetim açısından firmanın finansal itibarı iyidir, kredi kullanımında bir sorun yoktur. Genel stok seviyesi yüksek olmasına rağmen bazı ürünlerde satış kaybı vardır. Yüksek stok nedeniyle kutu veya görsel değiştirmek zordur, işçilik ve iskartalar yüksektir. Bant şeflerinden başlayarak tüm yöneticiler 20 yıl civarında kıdemlidir. 50 yaşındaki firma neredeyse aynı ekibin elinde bugünlere ulaşmıştır, dolayısıyla ekip aynı işleri yaparak aynı sonuçları alacağını düşünmektedir.

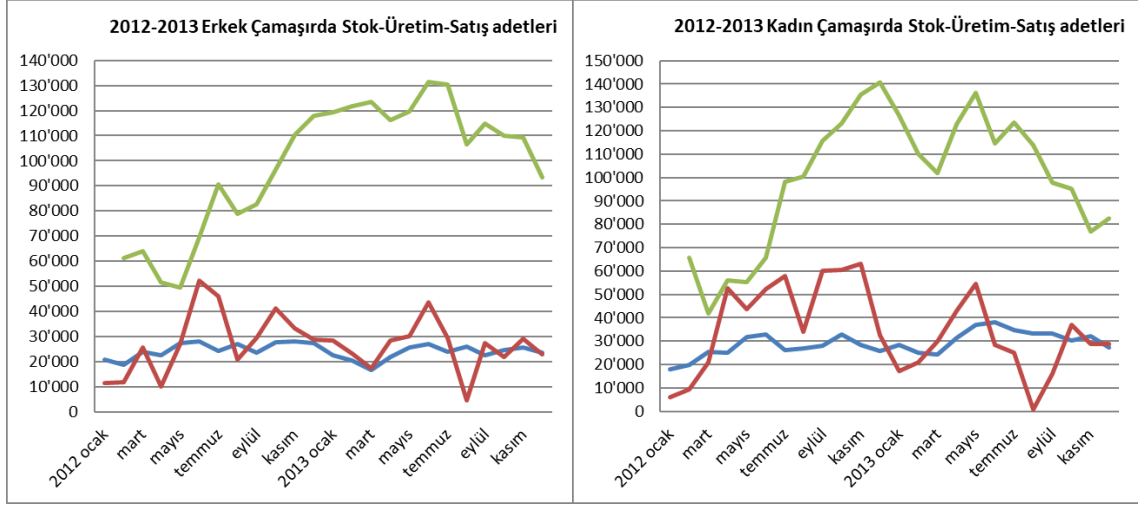
Sektörde sık rastlanan tipik bir kurgudur. Yönetim ekibi değişen şartlara uyum göstermekte zorlanmaktadır.

#### 4.1.1. Tahmin prosedürü

Tahmin performansı, piyasadaki satış potansiyelinin altında tahmin yapılması nedeniyle %93 olarak rapor edilmektedir. Hazır giyim ürünleri ortalamada 5 alt malzemeden oluşmaktadır. Malzemelerin ihtiyaç tahminindeki başarı oranı %90 iken 5 malzemeyi aynı anda hazır tutabilme olasılığı  $0.90 \times 0.90 \times 0.90 \times 0.90 \times 0.90 = 0.59$  dur. Tahmin başarısı %90' dan %95' e yükseltildiğinde bu olasılık  $0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 = 0.77$  olacaktır. Çevresel diğer şartlar aynı kalsa bile malzeme sayısı artarken "bulunurluk" sağlamak giderek zorlaşmaktadır. Mamul ürün için satış tahmini yapılan firmada malzeme ihtiyacı ürün ağaçlarına bağlı olarak belirlenmektedir.

#### 4.1.2 Üretim – satış uyumu

2012 – 2013 yılları için ay bazında 3 ana ürün grubu için üretim-satış verileri Şekil 2' de grafik olarak özetlenmiştir. Mavi renkle gösterilen satıştaki makul değişkenliğin, kırmızı renkle gösterilen üretimde kamçı etkisi yarattığı ve yeşil renkle gösterilen stokları dalgalandırdığı görülmektedir. Müşterilerin istediği renk-beden bulunamadığında bütün bir iş emriyle üretime girilmesi nedeniyle stok seviyesinde önemli artış yaşanmaktadır. Tahminler ürün toplamlarında %93 doğrulukta olmakla birlikte renk-beden bazında aksamalar vardır. Bu aksamalar fazla mesailer, hızlı paket servis vb ilave maliyetlere yol açmaktadır.



Şekil 2. 2012-2013 Yıllarında erkek-kadın ürün gruplarında stok-üretim-satış hareketleri  
*mavi-satışlar, kırmızı-üretimler, yeşil-stoklar*

2012-2013 sütyen satış verisi kullanılarak sezon indisi hesaplanmış, sezondan arındırılmış, trend için düzeltilmiş ve tekrar sezona uyarlanmıştır. Sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Potansiyele yaklaşırken tahmin yöntemi iyileştirildiği halde ortalama mutlak hata %28 MAD (Mean Absolute Deviation) olarak ölçülmüştür. Bu durumda tahmine göre çalışılıyorsa talepten 100.000 adet daha fazla üretim yapılacağı görülmüştür.

Tablo 1. 2012-2013 Sütyen için sezon-trend düzeltmeli 2014 satış tahmini ve fiili karşılaştırması

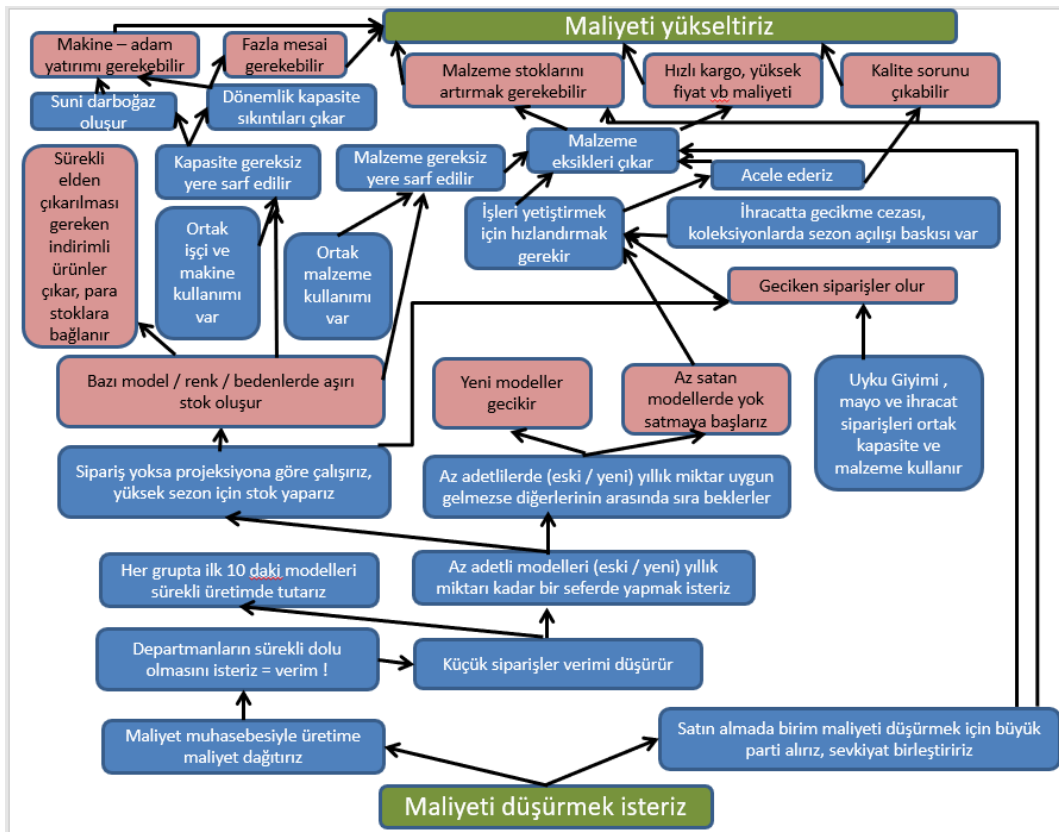
Aylar	2012 Fiili	2013 fiili	2012-2013 ortalama	Sezon indeksi	2014 tahmin	2014 fiili	Mutlak hata %
Ocak	30779	32834	31807	0,75	35247	38054	7,4%
Şubat	27161	44776	35969	0,85	40171	49040	18,1%
Mart	34294	48206	41250	0,97	46426	34798	33,4%
Nisan	51147	52999	52073	1,23	59058	47093	25,4%
Mayıs	47913	59337	53625	1,26	61282	44813	36,8%
Haziran	48205	56370	52288	1,23	60206	43655	37,9%
Temmuz	45418	52612	49015	1,15	56863	46886	21,3%
Ağustos	38052	54533	46293	1,09	54105	45616	18,6%
Eylül	42674	43650	43162	1,02	50820	52788	3,7%
Ekim	40460	38775	39618	0,93	46989	27643	70,0%
Kasım	33068	35845	34457	0,81	41166	31113	32,3%
Aralık	33074	27031	30053	0,71	36164	27472	31,6%
<b>Toplam</b>	<b>472245</b>	<b>546968</b>	<b>509610</b>		<b>588498</b>	<b>488981</b>	
<b>Ortalama</b>	<b>39354</b>	<b>45581</b>	<b>42467</b>		<b>49041</b>	<b>40749</b>	<b>28,0%</b>

#### 4.1.3 Sıkıntılar

Firma satış tahminine göre malzeme satın alınması yapmakta, istihdam ayarlamakta ve üretmektedir. Ancak tahmin hataları nedeniyle fazla mesai maliyeti yükselmektedir. Stok seviyesinin yüksekliği nakit parayı bağlamakta, satın alınmaların devam etmesi ve operasyonel giderler nedeniyle sürekli kredi kullanımı gerekmektedir. Müşteriler servis seviyesinden memnun değildir. Tasarım yeni ürünlerin reyona gecikmesinden ve sezon açılışına geç kalmak veya eksik ürünle başlamakta rahatsızdır. İşletme içinde stoklar yüksek miktardadır. Üretime girerken malzeme eksikliği çıkabilmektedir.

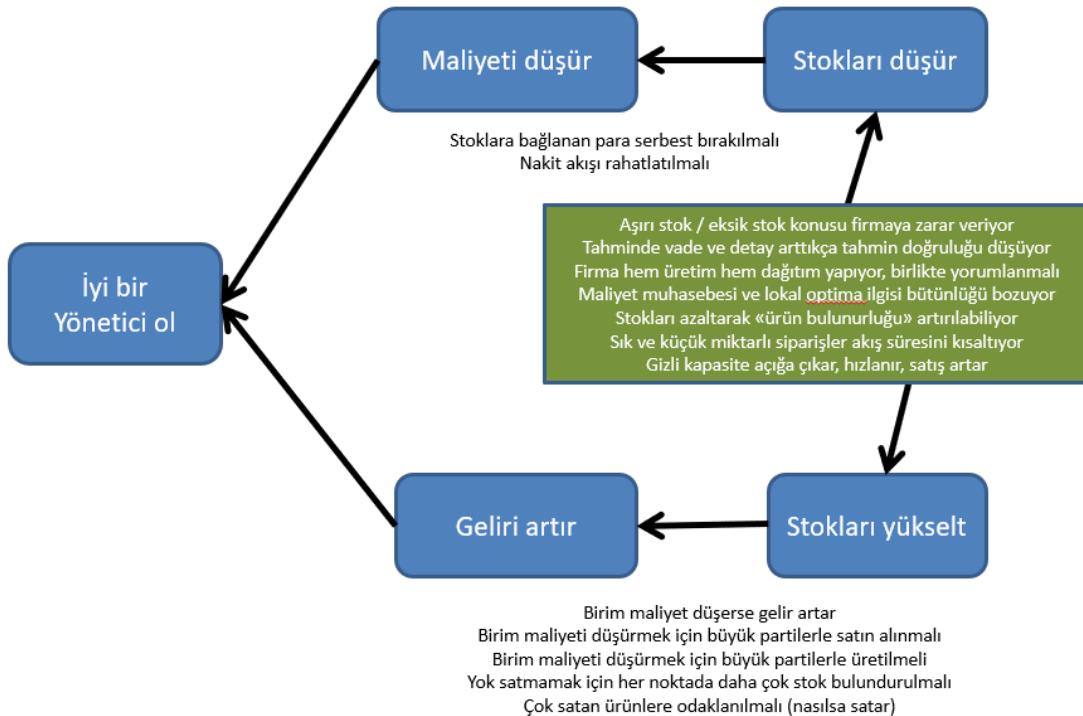
#### 4.2 Gelecek durum planı

Sorunların kök nedenini bulmak üzere Kısıtlar Teorisi Mevcut Durum Ağacı (CRT) kullanılacaktır (Dettmer, 2007). Bu yaklaşım yalın yaklaşımdaki gibi süreci değil, sebep-sonuç ilişkilerini sorgulamak içindir. Şekil 3'te firmanın mevcut durumu gösterilmiştir, istenmeyen etkiler pembe, aksiyonlar yeşil, mantıksal ara süreç çıkarımları mavi renkle verilmiştir. Yaşanan sıkıntıların kök sebebi birim maliyeti düşürme çabasıdır.



Şekil 3. CRT-Mevcut Durum Ağacı

Bu uygulamalar stokların artmasına neden olmaktadır. Firmanın ikilemi stok seviyesini azaltmak veya artırmak şeklindedir. Bu ikilemin (çatışma) çözümü için Çözüm Bulutu (CRD) tekniği kullanılacaktır, sebep-sonuç temellidir, olgular arasındaki ilişkileri ve bu ilişkileri kurduran varsayımların gözden geçirilerek bir varsayımın geçersizleştirilmesine gayret edilir (Dettmer, 2007). Kullanılan yöntemin diyagramı Şekil 4’ te gösterilmiştir.



Şekil 4. CRD-Çözüm bulutu

Dinamik Stok Yönetimi için DDMRP yöntemini kullandığımızda bazı ürünler için hedef stok seviyeleri artırılırken bazı ürünler için düşürüldüğü görülecektir. Stokların günlük raporlandığı, tamamlama sevkiyatlarının sıklaştırıldığı bir senaryoda yeterli dinamiklik sağlanacaktır.

### 4.3. Uygulama süreci

Yönetimin onay ve desteğini almak kritik önemdedir. Bunu işi yapacak ekibe eğitim ve güven vermek izlemektedir. DDMRP literatürü takip edilmiştir (Ptak ve Smith, 2011).

Son 3 yıllık ürün barkod (Stock Keeping Unit-SKU) ve mağaza bazında satış verisi bir excel dosyada bir araya getirilmiştir, DDMRP prensiplerine uygun olarak mağaza ve SKU bazında tamponlar (hedef stok, buffer) hesaplanmıştır. Örnek tampon hesaplaması aşağıdaki gibidir:

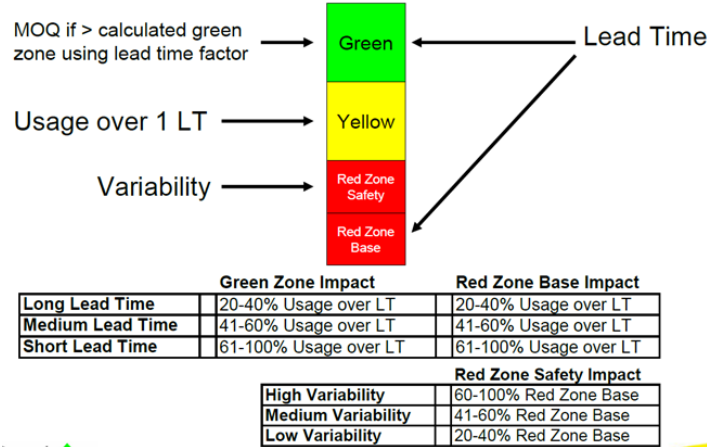
**Tampon Pozisyonu:** Müşterilerin hemen teslim istemesi, rakiplerin bu ihtiyacı karşılaması, talebin değişkenliği, tedarikte yaşanabilen değişkenlik, enflasyonun fiyata etkisi göz önünde tutularak mağazalarda ve merkez depoda her SKU için tampon olacaktır.

**Tampon Profili:** 4 kategoride belirlenmiştir.

- **Ürün:** Mağazalardaki tamponlar dağıtım tipidir, merkez depodakilerin bir kısmı üretim ve bir kısmı satınalma tipidir.
- **Değişkenlik:** Geçmiş satış verisi değişkenlik katsayısına (coefficient of variation-%cv) bakılarak düşük – orta – yüksek şeklinde 3 gruba ayrılmıştır.
- **Akış Süresi:** 3 grup vardır. Mağazalara haftada iki sefer dağıtım yapılacağı için kısa seçilmiştir, merkez depodaki üretimler orta ve ithal ürünler uzun seçilmiştir.
- **Asgari Sipariş:** Mağazalar için asgari sipariş adedi yoktur, üretim için 500 adet, satınalma için 1000 adet olarak belirlenmiştir.

**Tampon Bölgeleri:** Yeşil, Sarı ve 2 alt bölge kırmızı olarak 3 basamaklıdır. Şekil 5' te özetlenmiştir.

- **Sarı:** Tamponun ana bölgesidir. Geçmiş dönemdeki veri mümkün mertebe “temizlenerek” ve sıfır satış olan günler sıfır adet kabul edilerek ortalama günlük satış adedi belirlenmiştir. Ürün bazında akış süresi gün olarak alınmış, bu iki parametrenin çarpımıyla sarı bölge oluşturulmuştur.
- **Yeşil:** Akış süresine göre planlama tarafından belirlenen katsayı nispetinde sarı bölge kadardır. Ancak asgari sipariş miktarı veya asgari sipariş çevrimi varsa bu parametrelerden büyük olan dikkate alınmıştır.
- **Kırmızı:** Taban ve Emniyet olmak üzere 2 alt bölgesi vardır. Toplamları alınmıştır.
  - **Taban:** Akış süresine göre planlama tarafından belirlenen katsayı nispetinde sarı bölge kadardır.
  - **Emniyet:** Değişkenlik seviyesine göre planlama tarafından belirlenen katsayı nispetinde sarı bölge kadardır.



Şekil 5. Tampon bölgelerinin belirlenmesinde kılavuz

Satış ve Operasyon Planlama (S&OP) toplantılarında birlikte satılan (kombin) ürünler, ara bedenleri eksik kalan ürünler, vb gibi özel durumlar değerlendirildikten sonra mağaza bazında hedeflenen dinamik stok seviyesini aşan ürünler merkez depoya iade alınmıştır. Bunu takiben hedef seviyesinin altındaki stoklar acil olarak merkez depodan tamamlanmıştır. Mağazalar arası transferlerin azalması beklenmektedir.

Mağaza Müdürleri ve depo personelinin rahatsız olmaları olağandır. Dinamik stok seviyelerine göre günlük döngüsel sefer(milkrun) çift yönlü (ürün götürüp, varsa iadeleri toplayarak) sevkiyata başlanmıştır. Araç yetersizliği gibi engellere takılmamak için gerektiğinde ürünler hızlı paket servise verilmiştir.

S&OP toplantılarıyla güncel durum izlenmektedir. Hafta sonu veya milli bayram gibi aksamalar göz önünde tutularak stok yeter seviyesi 2 günden 5 güne çıkarılmıştır. Satış ekibinin indirim-promosyon vb planlarına göre önden hazırlık yapılmalıdır. Yeni koleksiyon girişlerinde mağaza müdürlerinin açılış talepleri dikkate alınmış, ilk haftanın sonunda rutin tamamlamaya geçilmiştir.

Servisin büyük kesimi merkez depodan verildiği için aynı mantıkla merkez depo da elden geçirilmiştir. Pilot çalışma çamaşır grubuyla sınırlı tutulmuştur. Çok sayıda üründe aşırı stok olmasına rağmen yetersiz stok olan ürünler için sadece gereken model-renk-bedenlerden oluşan acil iş emirleri verilerek eksikler hızlı tamamlanmıştır.

S&OP toplantılarında yıllık izin, bayram gibi özel günler dikkate alınmıştır. Benzer şekilde talebin kapasiteyi aşacağı öngörülen yüksek sezon öncesinde stok hazırlığı veya terminli sipariş, farklı fiyat, özel müşteri seçimi vb gibi alternatif çözümler düşünülmüştür.

ERP uygulamasından verilen iş emirleri zaman içinde excel üzerindeki sisteme uydurulmuştur. Merkez depodaki aşırı stoklu ürünler için ilk verilen iş emirleri bantları dolduracak kadar büyük olmamış ve işletmede huzursuzluk yaşanmıştır. Stok eriycek ve bulunan ürünler satılacağı için satışlar artacaktır, dolayısıyla bu aşamada “koruyucu kapasiteyi” oluşturan çalışanlardan kimse işten çıkarılmamıştır.

Kararlı bir şekilde standart iş emirleri küçültülmüş, sadece acil olanlar için ayrı iş emri verilmiştir. Üst yönetimin desteği sayesinde üretim uyum sağlamıştır. Üretimde prim uygulaması varsa prim kurallarının gözden geçirilmesi ve yeni işleyişe uydurulması gerekmektedir.

Günlük satış ve stok adetleriyle excel tablolar güncellendiğinde bazı mağazalarda bazı SKU'lar için tampon artışı, bazı SKU'lar için tampon düşüşü gerektiği fark edilmiştir. DDMRP ile sağlanan Dinamik Stok Yönetimi değişen duruma ayak uydurmayı gerektirmiştir. Bu noktada alışılmış min-maks sisteminden farklı bir işleyiş vardır. Belirlenen ortalama tüketime göre yüksek ölçüde farklı bir talep geldiğinde sistem bunu darbe olarak algılamakta ve uyarı vererek acil tamamlama istemektedir.

Excel dosyaların içerisindeki tampon ayarı yapılacak olan ürünlere, akış süresi tamponu tercih edildiye kırmızı bölgeye giren siparişlere veya eldeki stok seviyesine ilişkin uyarılar eklenebilir.

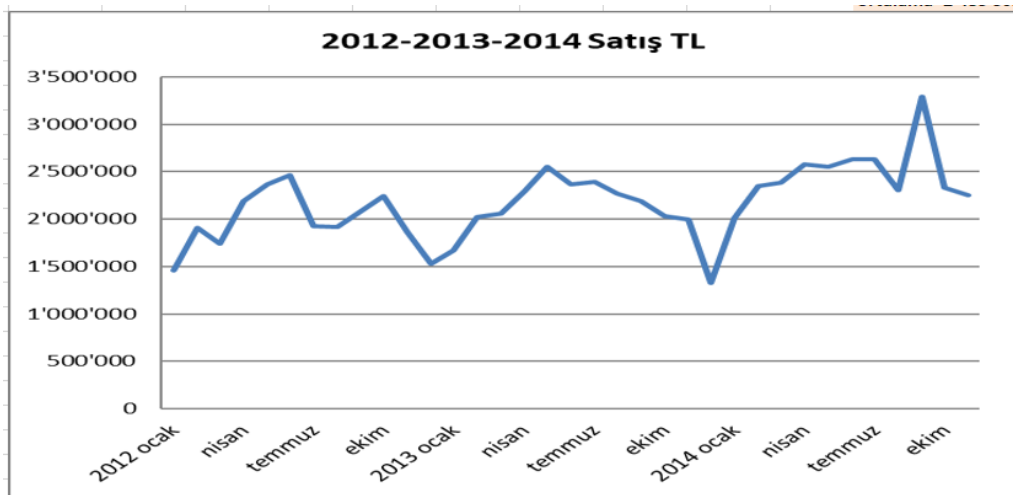
## 5. Sonuç ve öneriler

### 5.1. Karşılaştırmalı sonuçlar

Bir yılın sonunda üretimdeki akış süresi %33 kısalmış, yarı mamul stoklar %37 azalmış, mamul stoklar %17 düşmüş ve satışlar %20 artmıştır.

2013 Temmuz ayında uygulamaya geçildikten sonra stoklar düşmüş, Haziran ayında planlı yıllık izin nedeniyle fabrika kapanacağı için önceden stok hazırlığı yapılmıştır. Ağustos ayında izin nedeniyle üretim en düşük seviyededir. Kamçı etkisi azalmıştır.

İlave mağaza, satış personeli, promosyon, önemli bir piyasa değişikliği olmadığı halde ilgili çamaşır gruplarının yıllık ortalama satışı 2012'de 1.974.275 TL iken, 2013'te 2.096.059 TL ye ulaşırken sadece %6 artmıştır. Üstelik 2013 ikinci yarısında DDMRP uygulaması canlıya geçmiştir. 2014 yılında DDMRP etkisi artık belirgindir, ortalama satış 2.483.302 TL ile %18 artmıştır. Şekil 6'da grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. 2012-2013-2014 Yıllarında çamaşır grubu satış cirosu, TL



Mamul stoklarında ithal ürünlerdeki potansiyeli yakalayabilmek üzere bilinçli bir stok artışına gidilmiştir. Tüm ürünlerde toplam stok seviyesi düşmüştür. Aynı zamanda stokların yetersiz / aşırı stoklu bimodal dağılımı çan eğrisine doğru evrilmektedir. Mamul stok gruplarının Temmuz 2013 ile Şubat 2014 karşılaştırıldığında yetersiz stoklu ürün sayısı 750 kalemde 587 kaleme ve aşırı stoklu ürün sayısı 2816 kalemde 2341 kaleme düşmüştür. Orta gruplardaki ürün sayıları 349 kalemde 934 kaleme yükselmiştir.

Mağazalardaki duruma Ocak – Şubat dönemi için 2013 – 2014 karşılaştırmasıyla bakılmıştır. Yetersiz stok olan ürün-renk-beden (SKU) sarı gölgeli işaretlenmektedir. Çamaşır grubunda DDMRP uygulanmış, uyku ve mayo grupları geleneksel tarzda kontrol değişkeni olarak bırakılmıştır. Şekil 7’de görüleceği gibi çamaşır grubunda 2013 senesinde 175 kalemde yetersiz stok varken, artan satışa rağmen bir yıl içinde yetersiz stoklu ürünler 41 kaleme düşmüştür.

Şekil 7. Yok satan model-renk-beden (SKU) için 2013 şubat – 2014 şubat karşılaştırması

DDMRP uygulamasıyla akış süresi de kısaltmıştır. Dolayısıyla firma stok için üretim yapmak zorunda kalmadan siparişe üretimi tercih edebilecektir.

## 5.2. Öneriler

2014 senesindeki uygulama, excel tablolarından mevcut ERP sistemine aktarılmıştır. Daha sonra uygulamayı yürüten ekip firmadan ayrıldığı halde uygulamaya devam edilmiştir. Ancak ERP sistemi değiştirildiğinde eski sisteme entegre edilen DDMRP eklentisi maalesef yeni sisteme dahil edilmemiştir. Bugün uygulama yürürlükte değildir.

Geleneksel bir firmada, mikro ölçekli, özverili, yatırım yapılmadan elde edilen sonuçlardır. Bu sonuçların Türkiye ölçeğinde alınabilmesi ülkemiz için çok önemli bir fırsattır. Bu sayede perakende sektörü için genel stok seviyesi azalırken, satışlar artacak, devlet daha fazla kurumlar vergisi tahsil edebilecek, çalışanlar iş güvencesi artacak, aradıklarını bulan memnun müşteriler kazanılacak, KOBİ’ler de güncel teknolojiden yararlanabilecek, lojistik firmalar yatırımlarının verimini ölçek ekonomisiyle iyileştirebilecek, teknik servislerde parça bekleme süreleri azalacak (otomotiv, beyaz eşya,..), akış süreleri kısalacak ve Avrupa’ya yönelik işlerde rekabet gücü artacaktır.

Önerilen çalışma biçiminde;

- KOBİ’lerin odağı üretim olacaktır, stok yönetimini lojistik firmalar yapacaktır,
- Lojistik firmalar, tedarik zincirini KOBİ’ler adına yönetecek, KOBİ müşterilerine terminde veya günlük tamamlama servisi verecek, KOBİ’lere ihtiyaca uygun üretim siparişi geçecektir,
- Markası ve mağazaları olan büyük firmalar yazılımı kiralayabilecek, kendi operasyonunu yürütebilecek veya operasyonu lojistik firmalara devredebilecektir,
- Lojistik firmalar çok sayıda tedarikçi için ortak günlük sevkiyat, döngüsel sefer (milk run) dağıtım yapacaktır,
- Çoklu tedarikçi, çoklu müşteri, çoklu mağaza, çoklu ürün içeren sistemlere uygun yazılımlar vardır.

## Teşekkür

Uygulamanın excel dosya yapısı ve veri toplama konularına önemli katkısı olan Serdar Karademir’e teşekkür ederim.

## Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynakça

- Choi, T.-M., Govindan, K., ve Li, X. (2017, September 6). Innovative supply chain optimization models with multiple uncertainty factors. *Annals of Operational Research*. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2582-4>
- Dettmer, H. W. (2007). *The Logical Thinking Process*. Milwaukee, USA: ASQ Quality Press.
- Disney, S. M., ve Towill, D. R. (2003, 8 11). The effect of vendor managed inventory (VMI) dynamics on the Bullwhip Effect in supply chains. *International Journal of Production Economics*, s. 199-215. doi: [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00110-5](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00110-5)
- Fridgeirsson, T. V., Ingason, H. T., Jonasson, H. I., ve Kristjansdottir, B. H. (2021, 3 30). The VUCAlity of Projects: A New Approach to Assess a Project Risk in a Complex World. *Sustainability*, s. 1-13. doi: <https://doi.org/10.3390/su13073808>
- Georgiadis, G., ve Rajaram, K. (2013, September). The Retail Planning Problem Under Demand Uncertainty. *Production and Operations Management*, s. 1200-1213.
- Goldratt, E. M. (2009). *Isn't It Obvious?* Great Barrington, MA, USA: The North River Press.
- Goldratt, E., ve Goldratt-Ashlag, E. (2008). *The Choice*. Great Barrington: The North River Press.
- Goldratt-Research-Labs. (2022, Kasım 12). Hannah's Shop: <https://www.hannahsshop.com/vsl-order-form-uido> adresinden alındı
- Grzybowska, K., ve A. Tubis, A. (2022, 8 28). Supply Chain Resilience in Reality VUCA - An International Delphi Study. *Sustainability*. doi: <https://doi.org/10.3390/su141710711>
- Margherita, A., Banchi, E., Biffi, A., di Castri, G., ve Morelli, R. (2022, 10 9). Beyond Total Cost Management (TCM) to Systemic Value Management (SVM): Transformational Trends and a Research Manifesto for an Evolving Discipline. *Sustainability*. doi: <https://doi.org/10.3390/su141912890>
- Modi, K., Lowalekar, H., ve Bhatta, N. M. (2018, 9 25). Revolutionizing supply chain management the theory of constraints way: a case study. *International Journal of Production Research*.
- Ptak, C. A., ve Smith, C. J. (2011). *Orlicky's Material Requirement Planning 3rd ed.* ABD: McGraw-Hill Company.
- Ptak, C., ve Smith, C. (2016). *Demand Driven Material Requirements Planning*. Connecticut: Industrial Press, Inc.
- Stratton, R., ve Warburton, R. D. (2003, 8 11). The strategic integration of agile and lean supply. *International Journal of Production Economics*, s. 184-198.
- Thorsen, A., ve Yao, T. (2017, 10). Robust Inventory Control Under Demand and Lead Time Uncertainty. *Annals of Operations Research*. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2084-1>
- Wen, X., Choi, T.-M., ve Chung, S.-H. (2018, November 2). Fashion retail supply chain management: A review of operational models. *International Journal of Production Economics*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.10.012>
- Wu, H.-H., ve Tsai, T.-P. (2008). An enhanced model for TOC Supply Chain Replenishment Systems under capacity constraint. *IEEE International Conference On Service Operations - Logistics - Informatics* (s. 2683-2688). Beijing: IEEE. doi: [10.1109/SOLI.2008.4682991](https://doi.org/10.1109/SOLI.2008.4682991)
- Xu, W., Zhang, L., ve Cui, J. (2022, 4 23). Optimal Replenishment Policies and Trade Credit for Integrated Inventory Problems in Fuzzy Environment. *Mathematical Problems In Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/5597437>





# Journal of Turkish Operations Management

## Yeşil iki-aşamalı araç rotalama problemi: Gerçek yol eğimini dikkate alan yakıt tüketimi hesaplaması

Ergül Kısa Toğrul<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Hitit Üniversitesi, Çorum

e-mail: ergultogrul@hitit.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-7755-5173>

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 26.05.2023

Revize: 22.02.2024

Kabul: 27.03.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Sürdürülebilirlik,  
Lojistik,  
Yeşil İki-Aşamalı Araç  
Rotalama Problemi,  
Yakıt Tüketimi,  
Yol Eğimi

### Özet

Lojistik faaliyetlerin gün geçtikçe daha da yoğunlaşması ile artan enerji tüketimi ve sera gazı emisyonları çevresel sürdürülebilirliğe yönelik kaygılar yaratmakta ve taşımacılıkta farklı amaçlar edinmeyi zorunlu hale getirmektedir. Böylece, rotalama problemlerinde maliyet, mesafe ve zaman gibi temel amaçların yanı sıra yakıt tüketimi veya emisyonların da gözetilmesi kritik hale gelmektedir. Yakıt tüketimini etkileyen önemli unsurlardan biri olan yol eğiminin göz ardı edilmesi veya yüzeysel olarak hesaba katılması gerçeklikten uzak sonuçlar doğurabilmekte ve yanıltıcı kararların verilmesine neden olabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada yakıt tüketimini en aza indirmek amacıyla ele alınan Yeşil İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (Y-2A-ARP) için gerçekçi ve detaylı yol eğimi hesaplamalarının yapıldığı karma tamsayı programlama modeli ortaya konmuştur. Çok kısa bir mesafede dahi eğimin oldukça değişebileceği gerçeği ile dağıtım ağında yer alan tüm yollar belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış, her bir parçanın eğim değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu ilgili değerler kullanılarak yapılmıştır. Türkiye’de bir ecza deposunun dağıtım ağının örnek alındığı çalışmada konunun uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin araçların toplam yakıt tüketimini nasıl etkileyeceğinin irdelenmesi amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yol eğimi ve hız faktörlerinin araçların yakıt tüketiminde oldukça etkili olduğunu ve göz ardı edilmemesi gerektiğini göstermektedir.

## Green two-echelon vehicle routing problem: Fuel consumption calculation considering real road grade

### Article Info

#### Article History:

Received: 26.05.2023

Revised: 22.02.2024

Accepted: 27.03.2024

#### Keywords:

Sustainability,  
Logistics,  
Green Two-Echelon Vehicle  
Routing Problem,  
Fuel Consumption,  
Road Grade

### Abstract

With the intensification of logistics activities day by day, increasing energy consumption and greenhouse gas emissions create concerns about environmental sustainability and make it necessary to have different purposes in transportation. Therefore, in routing problems, it becomes critical to consider fuel consumption or emissions as well as basic objectives such as cost, distance or time. Ignoring or superficially considering the road grade, which is one of the important factors affecting fuel consumption, may lead to unrealistic results and misleading decisions. In this context, this study presents a mixed integer programming model for the Green Two-Echelon Vehicle Routing Problem (G-2E-VRP), which is considered to minimize fuel consumption, with realistic and detailed road gradient calculations. With the fact that the road grade can vary considerably even at a very short distance, all roads in the distribution network are divided into parts of certain lengths, the grade value of each part is calculated separately and the fuel consumption calculation is made using these relevant values. The applicability of the subject is shown in the study, which is taken as an example of the distribution network of a pharmaceutical warehouse in Turkey. In addition, sensitivity analyzes were performed in order to examine how the changes in grade and speed values will affect the total fuel consumption of the vehicles. The results show that road grade and speed factors are very efficient in fuel consumption of vehicles and should not be ignored.

## 1. Giriş

Tüm dünyada taşınan ürün miktarındaki ve trafikte seyreden araç hacmindeki artışlar, enerji ve çevre problemlerine yol açmaktadır. Böylece, çevresel emisyonların ve fosil yakıt tüketiminin azaltılması sürdürülebilir bir yaşam için kritik hale gelmektedir. Lojistik operasyonların da oldukça katkıda bulunduğu araç trafiği, özellikle yoğun nüfuslu bölgelerde büyük sıkıntılar doğurmaktadır, araçlar gürültü, kazalar, trafik sıkışıklığı ve hava kirliliği gibi negatif etkileri yüzünden insanların refahını bozmaktadır (Breunig, Schmid, Hartl ve Vidal, 2016). Doolan ve Muntean (2016)'nın çalışmasında aktarılan bilgilere göre, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde yaşayan çocukların lösemi ve diğer kanserlere yakalanma olasılığı altı kat daha fazladır. Ayrıca, trafikte zaman harcayan kişiler zamanla ilgili çok fazla stres yaşamakta, direksiyon başında geçirilen sürenin artması yüksek tansiyon ve obezite olasılığını da tetiklemektedir. Kentsel ve endüstriyel alanlarda hava kalitesinin araştırılması ve izlenmesi, halk sağlığını ve çevreyi korumak için hava kirliliği sorununun çözümüne yönelik atılan adımlardandır. Öte yandan, şehirlerdeki yerel makamlar, lojistik faaliyetlere emisyonları azaltılmış mümkün olduğu kadar çok aracı dahil etmek ve lojistik süreçleri şehir merkezindeki bölgelerden mümkün olduğunca uzağa taşımak için çaba göstermektedir. (Pamucar, Gigovic, Cirovic ve Regodic, 2016)

İki veya daha fazla kademeden oluşan ve taşıma sistemlerinin şehir içi trafik üzerindeki etkisini azaltma girişimi olarak ortaya atılmış olan çok kademeli dağıtım stratejisi, lojistik operasyonların çevresel ve sosyal etkilerini hafifletmede önemli bir role sahiptir (Li, Yuan, Lv ve Chang, 2016; Soysal, Bloemhof-Ruwaard ve Bektaş, 2015). Büyük kapasiteli araçları kentsel alanlardan uzak tutma hedefine ulaşmanın bir yolu, ürünün doğrudan müşterilere teslim edilmesinden ziyade ara depolar aracılığıyla çok kademeli dağıtım stratejilerini kullanmaktır (Perboli, Tadei ve Vigo, 2011). Ayrıca, çok kademeli dağıtım stratejileri araç kapasitelerinin her kademede verimli kullanılması nedeniyle önemli ekonomik avantajlar sağlamaktadır (Dellaert, Dashty Saridarq, Van Woensel ve Crainic, 2016).

Araçların etkin bir şekilde rotalanması, ürünlerin taşınmasında operasyonların iyileştirilmesi, yakıt tüketimi ve çevresel emisyonların azaltılmasında önemli bir husustur. Tek kademeli sistemleri ifade eden Araç Rotalama Problemi (ARP) bir dizi kısıt altında optimal araç rotalarının bulunmasına yönelik kombinatoriyal optimizasyonda en çok çalışılan problemlerden biridir ve şu şekilde tanımlanabilmektedir (Liu, Tao, Hu ve Xie, 2017): Bir depo ve belirli talepleri olan bir dizi müşteri bulunmaktadır. Kapasitesi kısıtlı bir araç filosu rotasına depodan başlamakta, yükü müşterilere dağıtmakta veya müşterilerden toplamakta ve son olarak depoya geri dönmektedir. Her bir müşteri tek bir araç tarafından ziyaret edilmektedir. Araçlar, kapasitesini aşan müşterilere hizmet verememektedir. ARP'nin amacı, minimum maliyet ile en uygun rota setini elde etmektir. ARP'nin bir türevidir olan İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi (2A-ARP) ise iki kademeli dağıtım sistemlerini ifade etmektedir. 2A-ARP'de dağıtım ürünün doğrudan merkezi depodan müşterilere teslim edilmesi yerine uydu olarak adlandırılan ara depolar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. İki aşamadan oluşan dağıtımın birinci aşamasında ürünler merkezi depodan uydulara getirilmekte ve burada düzenlenerek ikinci kademe araçlara aktarılmaktadır. İkinci aşamadaki dağıtım birinci aşamadaki araçlara nispeten daha küçük ve çevreye dost araçlar vasıtasıyla uydulardan müşterilere olacak şekilde yapılmaktadır. Bu sayede, büyük araçların şehir merkezlerine girişleri engellenmekte ve dağıtımın negatif etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır (Cuda, Guastaroba ve Speranza, 2015).

Rotalama çalışmalarında genellikle temel amaç mesafeyi veya süreyi minimize etmektir (Li, Liu, Jian ve Lu, 2018; Rao, Liu ve Wang, 2016; Soysal, Çimen ve Demir, 2018). Her ne kadar en kısa mesafe rotasının yakıt tüketimini ve emisyonları da en aza indireceği düşünülse de bu durum her zaman geçerli değildir. En kısa mesafe rotası, aracın yokuşları tırmanması için daha fazla enerji gerektiren ve bu süreçte daha fazla emisyon üreten dik yol eğimlerine sahip yol bölümlerini içerebilmektedir. Ayrıca, güzergahta yoğun şekilde sıkışık yollar bulunabilmektedir. Bu da yolda daha fazla zaman harcanmasına ve daha yüksek yakıt tüketimine neden olabilmektedir. Öte yandan, en kısa süreli bir rota, daha az sıkışık yollarda olsa da, aracın daha uzun mesafeler kat etmesine neden olabilmektedir. Daha uzun mesafeler için yüksek hızlarda seyahat etmek, daha düşük hızlarda daha doğrudan bir rotaya kıyasla daha yüksek yakıt tüketimi (ve emisyon) ile sonuçlanabilmektedir (Scora, Boriboonsomsin ve Barth, 2015). Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliğin artan önemi nedeniyle, rotalama problemlerinde toplam yakıt tüketimini en aza indiren, Erdoğan ve Miller-Hooks (2012) tarafından ortaya atılan Yeşil ARP (YARP) oldukça dikkat çekmiş ve birçok araştırmacı tarafından çalışmalarına konu edilmiştir. YARP, filo operasyonlarındaki enerji tüketimini azaltmak için yakıt tüketimini en aza indirmeyi veya biyodizel, etanol, hidrojen, metanol, doğalgaz, elektrik gibi alternatif yakıtlarla çalışan araçları benimsemeyi amaçlamaktadır (Asghari ve Al-e-hashem, 2021; Erdelic ve Caric, 2019).

Demir, Bektaş ve Laporte (2014), araçların yakıt tüketimini etkileyen faktörleri araç, çevre, trafik, sürücü ve operasyonlar olmak üzere beş sınıfa ayırmaktadır. *Araç faktörleri* aracın boş ağırlığını, aracın şeklini, motor boyutunu/türünü, motor sıcaklığını, şanzımanı, yakıt tipini; *çevre faktörleri* yol eğimini, kaplama türünü, ortam sıcaklığını, rakımı, rüzgar koşullarını; *trafik faktörleri* hızı, hızlanmayı/yavaşlamayı, trafik sıkışıklığını; *sürücü*

*faktörleri* sürücü agresifliğini, vites seçimini, rölanti süresini; *operasyon faktörleri* filo boyutunu/karışımını, yükü, boş kilometreleri ve duraklama sayısını içermektedir. Söz konusu faktörlerden bazılarının dikkate alınması, modellenmesi veya ölçülmesi zor ve zahmetlidir. Yol eğimi de bu faktörlerden bir tanesidir. Yol eğimi, yükseklik değişiminin yatay mesafeye oranı olarak tanımlanmaktadır (Fan, Song, Zhu, Wu, Zhai ve Yu, 2022).

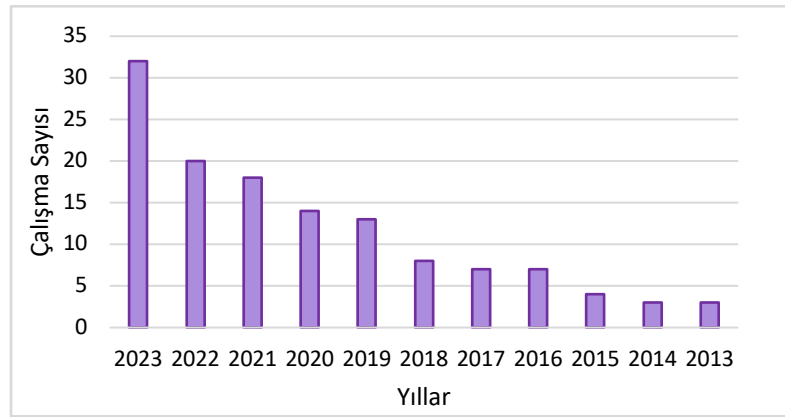
Gerçekleştirilen detaylı literatür incelemesi sonucunda rotalama problemlerine yönelik yapılan kimi çalışmaların yakıt tüketimini hesaplamada önemli unsurlar olan mesafeyi, aracın hızını ve yükünü dikkate aldığı görülmektedir. Ancak, diğer bir önemli husus olan yol eğiminin çalışmalarda ya dikkate alınmadığı, ya ortalama bir değer baz alındığı ya da yolun düz olduğu varsayımı ile 0 olarak hesaba katıldığı gözlemlenmektedir. 2A-ARP'de yakıt tüketimini veya emisyonları minimize etmeyi amaçlayan çalışmalarda yolun eğimini gerçekçi ve detaylı bir şekilde dikkate alan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada, Y-2A-ARP olarak adlandırılan, araçların toplam yakıt tüketimini minimize etmek amacıyla 2A-ARP ele alınmaktadır. Mesafenin, hızın, yükün ve yol eğiminin dikkate alındığı yakıt tüketimi hesaplamasında makul doğruluk ve yüksek uygulanabilirlik elde etmek için bir çözüm geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda, çok kısa bir mesafede dahi eğimin oldukça değişebileceği gerçeği ile tüm dağıtım ağında veya yol boyunca tek bir eğim değeriyle hesaplama yapmak yerine, dağıtım ağında yer alan tüm yollar belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış, her bir parçanın eğim değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu ilgili değerler kullanılarak yapılmıştır. Türkiye'de bir ecza deposunun dağıtım ağının örnek alındığı çalışmada konunun uygulanabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin araçların toplam yakıt tüketimini nasıl etkileyeceğinin irdelenmesi amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışma şu bölümlerden oluşmaktadır. İlgili literatür incelemesi Bölüm 2'de verilmektedir. Bölüm 3'te 2A-ARP'den bahsedilmekte, Y-2A-ARP tanımı, matematiksel modeli ve yakıt tüketimi hesaplaması detaylı bir şekilde açıklanmaktadır. Bölüm 4'te uygulama tasarımı, Bölüm 5'te ise uygulamaya yönelik analizler ve bulgular paylaşılmaktadır. Son bölümde, sonuç ve öneriler aktarılmaktadır.

## 2. Literatür incelemesi

ARP, lojistik alanında bir dizi aracın optimum veya optimuma yakın rotalarının bulunmasına yönelik oldukça sıklıkla çalışılan problemlerdendir. Literatürde çeşitli amaç (mesafe, araç sayısı, süre, yakıt tüketimi minimizasyonu vb.) ve kısıtları dikkate alan birçok ARP türüne ve çözüm yöntemine rastlamak mümkündür. Rotalama çalışmalarında genellikle temel amaç mesafeyi veya süreyi minimize etmektir (Li ve diğ., 2018; Rao ve diğ., 2016; Soysal ve diğ., 2018). Ancak, kaynakların sınırlı olması, çevresel kirliliğin önüne geçme gerekliliği vb. nedenler işletmeler için birer itici güç olmuş, insanların lojistiğe bakış açıları değişmiş, enerji tüketimi ve sera gazı emisyonunun en aza indirilmesi zamanla zorunluluk haline gelmiştir. Böylece, klasik rotalama probleminin bir uzantısı olarak, nispeten yeni bir araştırma alanı olan YARP *Erdoğan ve Miller-Hooks (2012)* tarafından ortaya atılmıştır. YARP, filo operasyonlarındaki enerji tüketimini azaltmak için yakıt tüketimini en aza indirmeyi veya biyodizel, etanol, hidrojen, metanol, doğalgaz, elektrik gibi alternatif yakıtlarla çalışan araçları benimsemeyi amaçlamaktadır (Asghari ve Al-e-hashem, 2021; Erdelic ve Caric, 2019).

2A-ARP de ARP türlerinden bir tanesidir. Çok aşamalı dağıtım ağını benimseyen 2A-ARP şehir merkezlerine büyük araçların girmemesi, buradaki dağıtımın küçük araçlar vasıtasıyla gerçekleştirilmesi gerektiğini savunmakta ve yakıt tüketimi, trafik sıkışıklığı, gürültü, hava kirliliği gibi dağıtımın negatif etkilerini azaltmayı amaçlamaktadır (Breunig, Baldacci, Hartl ve Vidal, 2019; Dellaert ve diğ., 2016; Li ve diğ., 2018). 2A-ARP'nin kim(ler) tarafından literatüre kazandırıldığıyla ilgili çeşitli görüş ve bilgiler bulunmaktadır. Problemin ilk resmi tanımı kimilerine göre *Gonzalez-Feliu (2008)* (Dellaert ve diğ., 2016; Eitzen, Lopez-Pires, Baran, Sandoya ve Chicaiza, 2017), kimilerine göre *Crainic, Ricciardi ve Storchi (2009)* (Li ve diğ., 2018; Perboli, Tadei ve Fadda, 2018; Sluijk, Florio, Kinable, Dellaert ve Van Woensel, 2023), kimilerine göre ise *Perboli ve diğ. (2011)* tarafından yapılmıştır (Jie, Yang, Zhang ve Huang, 2019). Literatüre girişinden bugüne çeşitli yazarlar tarafından araştırmalarına konu edinilen 2A-ARP çalışmaları ile ilgili özellikle son yıllarda artış gözlemlenmektedir (bkz. Şekil 1).



Şekil 1. Yıllara göre 2A-ARP çalışma sayıları (Web of Science Core Collection)

Her ne kadar literatürdeki 2A-ARP çalışmaları sayısı, çözüm yöntemi ve varsayımlar bakımından gün geçtikçe zenginleşiyor olsa da sürdürülebilir lojistiğin bir boyutu olan çevreci yaklaşım ile yakıt tüketimini veya emisyon değerlerini minimize etmeyi amaçlayan 2A-ARP çalışmaları sınırlı sayıdadır. Söz konusu çalışmalar Tablo 1 ile gösterilmektedir.

Tablo 1. Yakıt tüketimini dikkate alan 2A-ARP çalışmaları

Çalışma	Problem Türü	Çözüm Yöntemi	Yakıt Tüketimi Hesaplamasında Dikkate Alınan Faktörler			
			Mesafe	Hız	Yük	Yol Eğimi
Soysal ve diğ. (2015)	ZB-2A-KARP	TSDP	✓	✓	✓	0
Li ve diğ. (2016)	2A-ZKARP	CWTA, YA	✓		✓	
Wang ve diğ. (2017)	ÇY-2A-KARP	DKA, TP	✓	✓	✓	0
Wang ve diğ. (2018)	2A-İÇM-ARP	k-OK, GBOSGA-II	✓			
Babaei Tirkolaee ve diğ. (2019)	2A-KARP	KTP	✓			
Babagolzadeh ve diğ. (2019)	2A-AARP	TSDP	✓	✓	✓	0
Esmaceli ve Sahraçian (2019)	2A-KARP	TSDOP	✓			
Kancharla ve Ramadurai (2019)	ÇD-2A-YMRP	TSDP, UBKA	✓	✓	✓	0
Liu ve diğ. (2020)	KA-2A-ARP	TSDOP, KTHGAPSO	✓			
Wang ve Wen (2020)	DK-2A-HFARP	UGA	✓	✓	✓	0
Wang ve diğ. (2020)	DUZDİ-2A-ÇMARP	DP, DiP, Gk-OK, GBOSGA-II	✓			
Anderluh ve diğ. (2021)	2A-ARP	BKA, DKB	✓			
Liu ve Liao (2021)	2A- İATARP	k-OK, CWTA, UBKA	✓	✓	✓	0
Paul ve diğ. (2021)	ÇZPEDT-2A-ARP	ÇADKA	✓	✓	✓	0
Reinaldi ve diğ. (2021)	AT-2A-ARP	TSDP	✓			
Liu ve diğ. (2023)	KA-YB-2A-ARP	KTP, KTYBA	✓	✓	✓	
Sun ve Wang (2023)	EZ-TD-2A-ARP	BOSGA-II, ÇAPSO	✓			
Bu çalışma	Y-2A-ARP	KTP	✓	✓	✓	Gerçek

**2A-ARP:** İki-Aşamalı Araç Rotalama Problemi, **2A-KARP:** 2A Kapasiteli ARP, **ZB-2A-KARP:** Zamana Bağlı 2A-KARP, **2A-ZKARP:** İki Aşamalı Zaman Kısıtlı ARP, **ÇY-2A-KARP:** Çevreci Yaklaşımla 2A-KARP, **2A-İÇM-ARP:** 2A İşbirlikçi Çok Merkezli ARP, **2A-AARP:** 2A Açık ARP, **ÇD-2A-YMRP:** Çok Depolu 2A Yakıt Minimizasyonlu Rotalama Problemi, **KA-2A-ARP:** Karma Araçlı 2A-ARP, **DK-2A-HFARP:** Düşük Karbon 2A Heterojen Filolu ARP, **DUZDİ-2A-ÇMARP:** Durum Uzay Zamana Dayalı İşbirlikçi 2A Çok Merkezli ARP, **2A-İATARP:** 2A İşbirlikçi Atık Toplama ARP, **ÇZPEDT-2A-ARP:** Çoklu Zaman Pencere Eşzamanlı Dağıtım ve Toplamalı 2A-ARP, **AT-2A-**

**ARP:** Ara Tesisli 2A-ARP, **Y-2A-ARP:** Yeşil 2A-ARP, **KA-YB-2A-ARP:** Karma Araçlı Yüke Bağlı 2A-ARP, **EZ-TD-2A-ARP:** Eş Zamanlı Topla Dağıtım 2A-ARP, **TSDP:** Tam Sayılı Doğrusal Programlama, **CWTA:** Clark ve Wright Tasarruf Algoritması, **YA:** Yerel Arama, **DKA:** Değişken Komşu Arama, **TP:** Tamsayılı Programlama, **k-OK:** k-Ortalamalı Kümeleme, **GBOSGA-II:** Gelişmiş Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II, **KTP:** Karışık Tamsayılı Programlama, **TSDOP:** Tamsayılı Doğrusal Olmayan Programlama, **UBKA:** Uyarlanabilir Büyük Komşu Arama, **KTHGAPSO:** Kümeleme Tabanlı Hibrit Genetik Algoritma ve Parçacık Sürü Optimizasyonu, **UGA:** Uyarlanabilir Genetik Algoritma, **DP:** Doğrusal Programlama, **DiP:** Dinamik Programlama, **Gk-OK:** Gelişmiş k-Ortalamalı Kümeleme, **BKA:** Büyük Komşu Arama, **DKB:** Diktörtgen Kuboid Bölme, **ÇADKA:** Çok Amaçlı Değişken Komşu Arama, **KTYBA:** Küme Tabanlı Yapay Bağışıklık Algoritması, **BOSGA-II:** Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II, **ÇAPSO:** Çok Amaçlı Parçacık Sürü Optimizasyonu

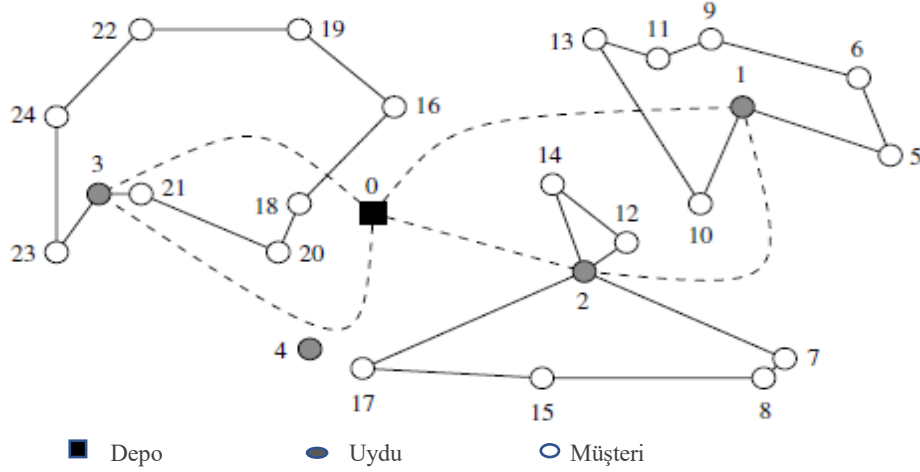
Tablo 1 incelendiğinde çalışmaların yakıt tüketimini hesaplamada önemli unsurlar olan mesafeyi, araç hızını ve yükünü dikkate aldığı görülmektedir. Öte yandan, diğer bir önemli husus olan yol eğiminin çalışmalarda ya dikkate alınmadığı ya da yolun düz olduğu varsayımı ile 0 olarak hesaba katıldığı gözlemlenmektedir. 2A-ARP çalışmalarında yolun eğimini gerçekçi ve detaylı bir şekilde dikkate alan herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Rotalama çalışmaları incelendiğinde genellikle eğimin 0 ya da ortalama bir değer olarak baz alındığı, yakıt tüketimini tahmin etmek amacıyla çok sayıda çalışmanın gerçekleştirilmesine rağmen, yol eğimini kapsamlı bir şekilde hesaplamalara dahil eden girişimlerin sınırlı olduğu gözlemlenmektedir. **Hooker (1988)** yakıt tasarrufunu en üst düzeye çıkarmak için nasıl araç kullanılması gerektiğini belirlemek adına 15 adet otomobilde yakıt tüketimi simülasyonu kullanmıştır. Dinamik programlamanın kullanıldığı çalışmada değişken yol (örn. sabit eğimli yol, engebeli yol) ve gezi türlerine yönelik yakıt tüketimini en aza indirmek için sürüş tarzı önerileri yapılmıştır. **Kamal, Mukai, Murata ve Kawabe (2011)** eko-sürüş sistemi önermişler ve yukarı- aşağı yol eğimlerinin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bir aracın tükettiği yakıtın, hız ve ivme özelliklerinin yanı sıra yol eğimlerinden de büyük ölçüde etkilendiği sonucuna varmışlardır. **Scora ve diğ. (2015)** ağır hizmet kamyonları için araç ağırlığını, gerçek zamanlı trafik hızını ve yol eğimini hesaba katan enerji ve emisyon modelini içeren bir eko-rotalama ve navigasyon sistemi geliştirmişlerdir. **Wang, Du, Yu, Huang ve Li (2015)** Google Earth'den elde edilen yükseklik verilerini kullanarak seyahat hızı, yol eğimi ve yakıt tüketimi arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. **Alinaghian ve Naderipour (2016)** zamana bağlı ARP'de yakıt tüketiminde etkili olan faktörleri kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Zaman içindeki yakıt tüketimini hesaplamak için yük, araç hızı, yol eğimi ve şehir trafiği gibi faktörleri dikkate alarak yeni ve kapsamlı bir model sunmuşlardır. **Rao ve diğ. (2016)** Yakıt Tüketimi ARP olarak adlandırdıkları problemlerinde yakıt tüketimini yol eğiminin derecesini dikkate alarak ölçmüşlerdir. Herhangi iki müşteri arasındaki yol eğimi derecesini, dikey koordinatlar arasındaki farkı yolun mesafesine bölerek hesaplamışlardır. **Kang, Shen ve Li (2019)** yeni bir yol eğimi tahmin sistemi önermişlerdir. Yol eğimini tahmin etmek için araç hareket halindeyken araç durumlarını (hız, ivme, direksiyon hızı, konum) sürekli olarak ölçen bir akıllı telefon kullanmışlardır. Yakıt tüketimi ve hava kirliliği emisyonunu hesaplamak için elde edilen eğim değerlerini modellerine entegre etmişler ve yol eğiminin dikkate alınmadığı değerlere göre %33.4 oranında artış gözlemlenmiştir. **Schröder ve Cabral (2019)** Coğrafik Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı rotalama modeli ile yakıt tüketimi ve CO2 emisyon hesaplamasında yolun eğimini de dikkate almışlardır. Yol segmentlerini alt bölümlere ayırarak yol eğimini hesaplarken Sayısal Yükseklik Modeli (SYM)'ni kullanmışlardır. **Fan, Zhang, Tian, Lv ve Fan (2021)** zamana bağlı zaman pencereli çok depolu YARP modelinde yakıt tüketimi hesaplamasında yol eğimi ve araç yükü için düzeltme katsayıları kullanmışlardır. **Lai, Costa, Demir, Florio ve Van Woensel (2021)** toplam seyahat maliyetinin yakıt tüketimi ve CO2 emisyonlarının bir fonksiyonu olduğu Kirlilik Rotalama ve Hız Optimizasyon Problemi için etkin bir çözüm yöntemi sunmuşlardır. Yol eğimi hesaplamasında yükseklik bilgilerini kullanmışlar ve iki düğüm arasındaki yol eğimi derecesini yükseklik farklarını (başlangıç-bitiş) yolun mesafesine bölerek hesaplamışlardır. **Dündar, Soysal, Ömürgönülşen ve Kanellopoulos (2022)** Yeşil Dinamik Gezgin Satıcı Problemi için bir karar destek modeli geliştirmişlerdir. Yakıt tüketimi hesaplamasında yolun eğimini detaylı bir şekilde ele almışlar, tüm dağıtım ağında gerçek eğim değerlerini kullanmışlardır. Dağıtım ağındaki her bir ark yaklaşık 10m'lik uzunluklarda parçalara ayrılmış, SYM aracılığıyla tüm parçaların eğim değerleri elde edilmiştir. **Fan ve diğ. (2022)** yakıt tüketimini hesaplamak üzere gerçek yol eğimlerini elde etmek için gerçekleştirdikleri çalışmalarında 680 hafif hizmet aracından veri toplamışlardır. Önerilen yöntemin, yol eğimini %0,12 ortalama mutlak hata doğrulukla elde ettiği sonucuna varmışlardır.

Detaylı literatür incelemesi sonucunda, her ne kadar gün geçtikçe çalışma sayıları artsa da, 2A-ARP çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu gözlemlenmektedir. Bu araştırmalardan rotalama kararlarında yakıt tüketimi ve/veya emisyon salınımını en aza indirmeyi amaç edinerek çevreci bir yaklaşımla sürdürülebilirliğe odaklanan çalışmaların sayısı ise daha da kısıtlıdır. Bu çalışmada, sınırlı literatüre katkıda bulunmak amacıyla Y-2A-ARP çalışılmıştır. Yakıt tüketimi hesaplamasında mesafe, hız, yük ve eğim faktörleri dikkate alınmıştır. Dağıtım ağında yer alan tüm yolların belirli uzunluklarda parçalara ayrılmasına ve her bir parçanın eğim değerinin ayrı ayrı dikkate alınmasına dayalı yakıt tüketimi hesaplaması yapılmış, rotalama kararları da buna göre verilmiştir.

### 3. İki-aşamalı araç rotalama problemi

ARP'ye nazaran yeni bir problem türü olan 2A-ARP, iki kademeli bir yük dağıtım sisteminde araçların optimal güzergahının belirlenmesini amaçlamaktadır. Dağıtım ağındaki düğümler sırasıyla merkezi depo, uydular (satellites) olarak adlandırılan ara depolar ve müşterilerden oluşmaktadır. Birinci aşamada merkezi depodan uydulara, ikinci aşamada ise uydulardan müşterilere ürün akışı söz konusu olmaktadır. Ürünlerin doğrudan merkezi depodan müşterilere taşınmasına izin verilmemektedir. Farklı seviyelerdeki araçlar taşıma kapasitesi açısından farklılık göstermekte iken aynı seviyedeki araçlar benzer özelliklere sahiptir (homojendir). Birinci aşamada büyük kapasiteli araçlar kullanılmaktadır. Bu araçlar, rotasına merkezi depodan başlamakta, bir veya birden fazla uyduya uğradıktan sonra merkezi depoya geri dönmektedirler. Uydu noktalarına getirilen ürünler burada düzenlendikten sonra müşterilere taşınmak üzere ikinci aşamadaki araçlara aktarılmaktadır. Bir uydunun sınırlı bir kapasitesi vardır. Her bir uydu birden fazla birinci seviye rotadan hizmet alabilmektedir. İkinci aşamada birinci aşamaya nispeten daha küçük ve/veya çevreye dost araçlar kullanılmaktadır. İkinci aşamadaki araçlar rotasına herhangi bir uydudan başlamakta, bir veya birden fazla müşteriye uğradıktan sonra başladığı uydu noktasına geri dönmektedir (Baldacci, Mingozzi, Roberti ve Calvo, 2013; Cuda ve diğ., 2015; Grangier, Gendreau, Lehuède ve Rousseau, 2016; Perboli ve diğ., 2018; Soysal ve diğ., 2015; Zhou, Baldacci, Vigo ve Wang, 2018). 2A-ARP'nin dağıtım ağına yönelik bir örnek Şekil 2 ile gösterilmektedir.



Şekil 2. 2A-ARP dağıtım ağı örneği (Baldacci ve diğ., 2013)

#### 3.1. Yeşil iki-aşamalı araç rotalama problemi tanımı

Y-2A-ARP, tam yönlendirilmiş bir şebeke üzerinde tanımlanmaktadır. İki kademeye bölünmüş olan dağıtım ağında bir adet merkezi depo, belirli sayıda uydu (ara depo) ve müşteri bulunmaktadır. Dağıtımın birinci aşamasında ürünler depodan birincil kademe araçlar vasıtasıyla uydulara; ikinci aşamasında ise ikincil kademe araçlar vasıtasıyla uydulardan müşterilere yönlendirilmektedir. Birincil kademe araçlar, ikincil kademe araçlara nispeten daha büyüktür ve dolayısıyla daha çok taşıma kapasitesine sahiptir. Her iki kademede de araçlar kendi içlerinde homojendir. Diğer bir deyişle, araçların taşıma kapasitesi, bakım maliyeti, sigorta maliyeti vb. açısından aynı olduğu varsayılmaktadır. Uyduların taşıma kapasitesi, buralardan yönlendirilebilecek maksimum araç sayısı ile belirlenmektedir. Birinci aşamada uydudan uyduya gidişlere izin verilirken; ikinci aşamada bu gidişler engellenmektedir. Müşteri talepleri önceden bilinmektedir ve araçların operasyonları esnasında da deterministiktir. Problemin amacı toplam yakıt tüketimini minimize edecek optimal birincil ve ikincil kademe araç rotalarının belirlenmesidir.

Problemde kullanılan semboller ve açıklamaları Tablo 2 ile sunulmaktadır.

Tablo 2. Y-2A-ARP Modelinde Yer Alan Küme, Parametre ve Karar Değişkenleri

Grup	Sembol	Tanım
Kümeleler	D	Düğümleler kümesi, $D = D_0 \cup D_u \cup D_m$
	$D_0$	Depo, $D_0 = \{0\}$
	$D_u$	Uydular kümesi, $D_u = \{1, 2, \dots, u\}$
	$D_m$	Müşteriler kümesi, $D_m = \{1, 2, \dots, m\}$
	Y	Birinci aşama yaylar kümesi, $Y = \{(i, j) \mid i, j \in D_0 \cup D_u, i \neq j\}$
	$Y'$	İkinci aşama yaylar kümesi, $Y' = \{(i, j) \mid i, j \in D_u \cup D_m, i \neq j\}$
	$\delta^-(u)$	Birinci aşamada u uydusuna gelen yaylar kümesi, $u \in D_u$
	$\delta^+(u)$	Birinci aşamada u uydusundan çıkan yaylar kümesi, $u \in D_u$
	$\delta^-(i)$	İkinci aşamada i düğümüne gelen yaylar kümesi, $i \in D_u \cup D_m$
	$\delta^+(i)$	İkinci aşamada i düğümünden çıkan yaylar kümesi, $i \in D_u \cup D_m$
A	Birincil kademe araçlar kümesi, $A = \{1, 2, \dots, a\}$	
Parametreleler	K	Birincil kademe araç kapasitesi (kg)
	$K'$	İkincil kademe araç kapasitesi (kg)
	$a'$	İkincil kademe araç sayısı (adet)
	$a'_u$	u uydusunda kullanılabilir maksimum ikincil kademe araç sayısı, $u \in D_u$ (adet)
	$d_i$	i müşterisinin talep miktarı, $i \in D_m$ (kg)
	$m_{ij}$	Birinci aşamada i ve j düğümleri arasındaki mesafe (m)
	$m'_{cb}$	İkinci aşamada c ve b düğümleri arasındaki mesafe (m)
	$h_{ij}$	Birincil kademe aracın i ve j düğümleri arasındaki hızı (m/s)
	$h'_{cb}$	İkincil kademe aracın c ve b düğümleri arasındaki hızı (m/s)
Karar Değişkenleleri	$x_{ija}$	a aracının i'den j'ye gitmesi durumunda 1, diğer durumlarda 0 değerini alan ikili karar değişkeni, $(i, j) \in Y, a \in A$
	$p_{ua}$	u uydusuna a aracı ile taşınan ürün miktarı, $u \in D_u, a \in A$
	$z_{ija}$	i düğümünden ayrılırken a aracı üzerindeki yük, $(i, j) \in Y, a \in A$
	$y_{cbu}$	İkinci kademe u uydusundan ayrılmış aracın c'den b'ye gitmesi durumunda 1, diğer durumda 0 değerini alan ikili karar değişkeni, $(c, b) \in Y', u \in D_u$
	$t_{cbu}$	c düğümünden ayrılırken u uydusundan yönlendirilmiş aracın yükü, $(c, b) \in Y', u \in D_u$
	$s_u$	u uydusundan temin edilen talep miktarı, $u \in D_u$

### 3.2. Yakıt tüketimi hesaplaması

Yol eğimi araçların yakıt tüketimini etkileyen önemli faktörlerdendir. Öte yandan, yakıt tüketimini minimize etmeyi amaçlayan rotalama problemlerine yönelik yapılan çalışmaların bazılarında yol eğiminin hiç dikkate alınmadığı bazılarında ise yüzeysel olarak dikkate alındığı gözlemlenmektedir. Diğer bir deyişle, hesaplamalarda eğimin 0 olduğu, dağıtım ağındaki tüm yolların ortalama bir eğim değerine sahip olduğu veya herhangi bir yol boyunca eğimin değişmeyip sabit bir değere sahip olduğu varsayımıyla hesaplama yapıldığı görülmektedir. Gerçek hayatta ise yolun eğimi çok küçük mesafelerde dahi oldukça farklılaşabilmektedir. Bu bağlamda, çalışmada Dündar ve diğ. (2022)'nin çalışmasındaki yaklaşıma benzer bir şekilde dağıtım ağındaki her bir yay (yol) belirli uzunluklarda parçalara ayrılmakta ve yakıt tüketimi hesaplaması da bu parçalar bazında yapılmaktadır.

Araçların yakıt tüketimi hesaplamasında, ARP çalışmalarında yaygınlıkla kullanılan Barth, Younglove ve Scora (2005)'in yakıt tüketimi fonksiyonu temel alınmıştır. Mesafenin, araç hızının, araç yükünün ve yol eğiminin kapsamlı bir şekilde hesaba katıldığı yakıt tüketimi fonksiyonu aşağıda verilmektedir. Ayrıca, fonksiyonda yer alan semboller Tablo 3 ile gösterilmektedir.

**Tablo 3.** Yakıt tüketimi hesaplamasında kullanılan semboller ve açıklamaları

Sembol	Açıklama
$\phi$	Hava-yakıt oranı
$k$	Motor sürtünme faktörü (kilojul/devir/litre)
$N$	Motor hızı (devir/saniye)
$V_s$	Motor boşaltma oranı (litre)
$\mu$	Yakıt tüketim katsayısı
$\eta$	Motor verimliliği parametresi
$\eta_{t_f}$	Aracın güç aktarma organları verimliliği
$r_1$	Birinci aşamadaki aracın boş ağırlığı (kg)
$r_2$	İkinci aşamadaki aracın boş ağırlığı (kg)
$g$	Yerçekimi katsayısı (metre/ s <sup>2</sup> )
$\theta_{ijp}$	Birinci aşamada i ve j düğümleri arasındaki p. parçanın yol eğiminin açısı derecesi ( $i,j \in Y, p \in P$ )
$\theta'_{cbp'}$	İkinci aşamada c ve b düğümleri arasındaki p'. parçanın yol eğiminin açısı derecesi ( $c,b \in Y', p' \in P'$ )
$C_d$	Aerodinamik sürüklenme katsayısı
$\rho$	Hava yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$S_1$	Birinci aşamadaki aracın ön yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$S_2$	İkinci aşamadaki aracın ön yüzey alanı (m <sup>2</sup> )
$C_r$	Yuvarlanma direnci katsayısı

$$\text{Yakıt (gram)} = f_{ij}^1 + f_{cb}^2 \quad (1)$$

(1) numaralı denklemde,  $f_{ij}^1 = \sum_{p \in P} f_{ijp}^1$  ve  $f_{cb}^2 = \sum_{p' \in P'} f_{cbp'}^2$  olmak üzere,  $f_{ij}^1$  ve  $f_{cb}^2$  sırasıyla birinci ve ikinci aşamadaki araçların toplam yakıt tüketimini göstermektedir.

$$f_{ijp}^1 = f_{ijp}^{11} + f_{ijp}^{12} \quad (2)$$

$$f_{cbp'}^2 = f_{cbp'}^{21} + f_{cbp'}^{22} \quad (3)$$

$$f_{ijp}^{11} = \frac{C_1 m_{ijp}}{h_{ij}} \quad (4)$$

$$f_{ijp}^{12} = C_2 ((r_1 + z_{ija}) g m_{ijp} \sin \theta_{ijp} + C_3 h_{ij}^2 m_{ijp} + (r_1 + z_{ija}) g m_{ijp} C_r \cos \theta_{ijp}) \quad (5)$$

$$f_{cbp'}^{21} = \frac{C_1 m'_{cbp'}}{h'_{cb}} \quad (6)$$

$$f_{cbp'}^{22} = C_2 ((r_2 + t_{cbu}) g m'_{cbp'} \sin \theta'_{cbp'} + C_3 h'_{cb}{}^2 m'_{cbp'} + (r_2 + t_{cbu}) g m'_{cbp'} C_r \cos \theta'_{cbp'}) \quad (7)$$

$C_1 = \phi k N V_s / \mu$ ,  $C_2 = \phi / 1000 \eta \mu \eta_{t_f}$ ,  $C_3 = 0,5 C_d \rho S_1$ ,  $C_3' = 0,5 C_d \rho S_2$  olmak üzere (2) ve (3) numaralı denklemlerin birinci kısımları ( $f_{ijp}^{11}$  ve  $f_{cbp'}^{21}$ ) motor kullanımından kaynaklanan yakıt tüketimi, ikinci kısımları ( $f_{ijp}^{12}$  ve  $f_{cbp'}^{22}$ ) ise yokuş yukarı eğimli bir yolda sürüşten kaynaklanan yakıt tüketimidir (Rao ve diğ., 2016). P ve P' sırasıyla birinci ve ikinci aşamadaki parçalar kümesidir.  $p \in P$  ve  $p' \in P'$  olmak üzere,  $m_{ijp}$  birinci aşamada



$i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki  $p$ . parçanın uzunluğunu ve  $m'_{c b p'}$  ise ikinci aşamada  $c$  ve  $b$  düğümleri arasındaki  $p'$ . parçanın uzunluğunu göstermektedir.

(5) ve (7) numaralı fonksiyonlarda yer alan yolun eğimi, ilgili parçanın bitiş ve başlangıç noktaları yükseklik farklarının parçanın uzunluğuna bölünmesi yoluyla hesaplanmaktadır. Eğimi derece cinsinden ifade etmek için ise “arcsin” fonksiyonu kullanılmaktadır (Dündar ve diğ., 2022; Rao ve diğ., 2016). Söz konusu hesaplamalar aşağıda (8) ve (9) numaralı denklemlerle verilmektedir.

$$\theta_{ijp} = \text{Arcsin} \frac{Z_{ijp+1} - Z_{ijp}}{m_{ijp}} \tag{8}$$

$$\theta'_{cbp'} = \text{Arcsin} \frac{Z_{cbp'+1} - Z_{cbp'}}{m'_{cbp'}} \tag{9}$$

Aracın yokuş aşağı doğru gitmesi durumunda, diğer bir ifadeyle  $Z_{ijp+1} < Z_{ijp}$  veya  $Z_{cbp'+1} < Z_{cbp'}$ ,  $f^{12}_{ijp}$  ve  $f^{22}_{cbp'}$  hesaplamalarında negatif değerler elde edilebilmektedir. Ancak, bu durum pratikte herhangi bir anlam ifade etmemektedir. Söz konusu durumda  $f^{11}_{ijp} = f^{11}_{ijp}$  ve  $f^{21}_{cbp'} = f^{21}_{cbp'}$  olarak hesaplanmaktadır (Rao ve diğ., 2016). Özetle, parçanın yakıt tüketimi birinci aşamada  $i$  düğümünden  $j$  düğüme, ikinci aşamada  $c$  düğümünden  $b$  düğüme sırasıyla (10) ve (11) numaralı fonksiyonlarla hesaplanmaktadır.

$$f^{1}_{ijp} = \begin{cases} f^{11}_{ijp} + f^{12}_{ijp} & f^{12}_{ijp} > 0 \\ f^{11}_{ijp} & f^{12}_{ijp} \leq 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$f^{2}_{cbp'} = \begin{cases} f^{21}_{cbp'} + f^{22}_{cbp'} & f^{22}_{cbp'} > 0 \\ f^{21}_{cbp'} & f^{22}_{cbp'} \leq 0 \end{cases} \tag{11}$$

### 3.3. Matematiksel model

Jepsen, Spoorendonk ve Ropke (2013)’ün çalışmasındaki modelin esas alınarak oluşturulduğu Y-2A-ARP matematiksel modeli aşağıda sunulmaktadır.

$$\text{Minimize} \sum_{a \in A} \sum_{(i,j) \in Y} \sum_{p \in P} f^1_{ijp} x_{ija} + \sum_{u \in D_u} \sum_{(c,b) \in Y'} \sum_{p' \in P'} f^2_{cbp'} y_{cbu} \tag{12}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} x_{ija} = \sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} x_{ija} \quad \forall u \in D_u, a \in A \tag{13}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} x_{ija} \leq 1 \quad \forall u \in D_0 \cup D_u, a \in A \tag{14}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^+(u)} z_{ija} = \sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} z_{ija} - p_{ia} \quad \forall u \in D_u, a \in A \tag{15}$$

$$z_{ija} \leq K x_{ija} \quad \forall (i,j) \in Y, a \in A \tag{16}$$

$$\sum_{(i,j) \in \delta^-(u)} z_{ija} \leq 0 \quad \forall u \in D_0, a \in A \tag{17}$$

$$\sum_{a \in A} p_{ua} = s_u \quad \forall u \in D_u \tag{18}$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c,b) \in \delta^+(i)} y_{cbu} = 1 \quad \forall i \in D_m \tag{19}$$

$$\sum_{(c,b) \in \delta^-(i)} y_{cbu} = \sum_{(c,b) \in \delta^+(i)} y_{cbu} \quad \forall i \in D_m, u \in D_u \tag{20}$$

$$\sum_{u \in D_u \setminus \{u\}} \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u'} + \sum_{u \in D_u \setminus \{u\}} \sum_{(c, b) \in \delta^-(u)} y_{c b u'} = 0 \quad \forall u \in D_u \quad (21)$$

$$\sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u} \leq a'_u \quad \forall u \in D_u \quad (22)$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} y_{c b u} \leq a' \quad (23)$$

$$\sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^+(i)} t_{c b u} = \sum_{u \in D_u} \sum_{(c, b) \in \delta^-(i)} t_{c b u} - d_i \quad \forall i \in D_m \quad (24)$$

$$t_{c b u} \leq K' y_{c b u} \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (25)$$

$$s_u = \sum_{(c, b) \in \delta^+(u)} t_{c b u} \quad \forall u \in D_u \quad (26)$$

$$\sum_{u \in D_u} s_u = \sum_{i \in D_m} d_i \quad \forall u \in D_u \quad (27)$$

$$x_{i j a} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in Y, a \in A \quad (28)$$

$$y_{c b u} \in \{0,1\} \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (29)$$

$$p_{u a} \geq 0 \quad \forall u \in D_u, a \in A \quad (30)$$

$$z_{i j a} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in Y, a \in A \quad (31)$$

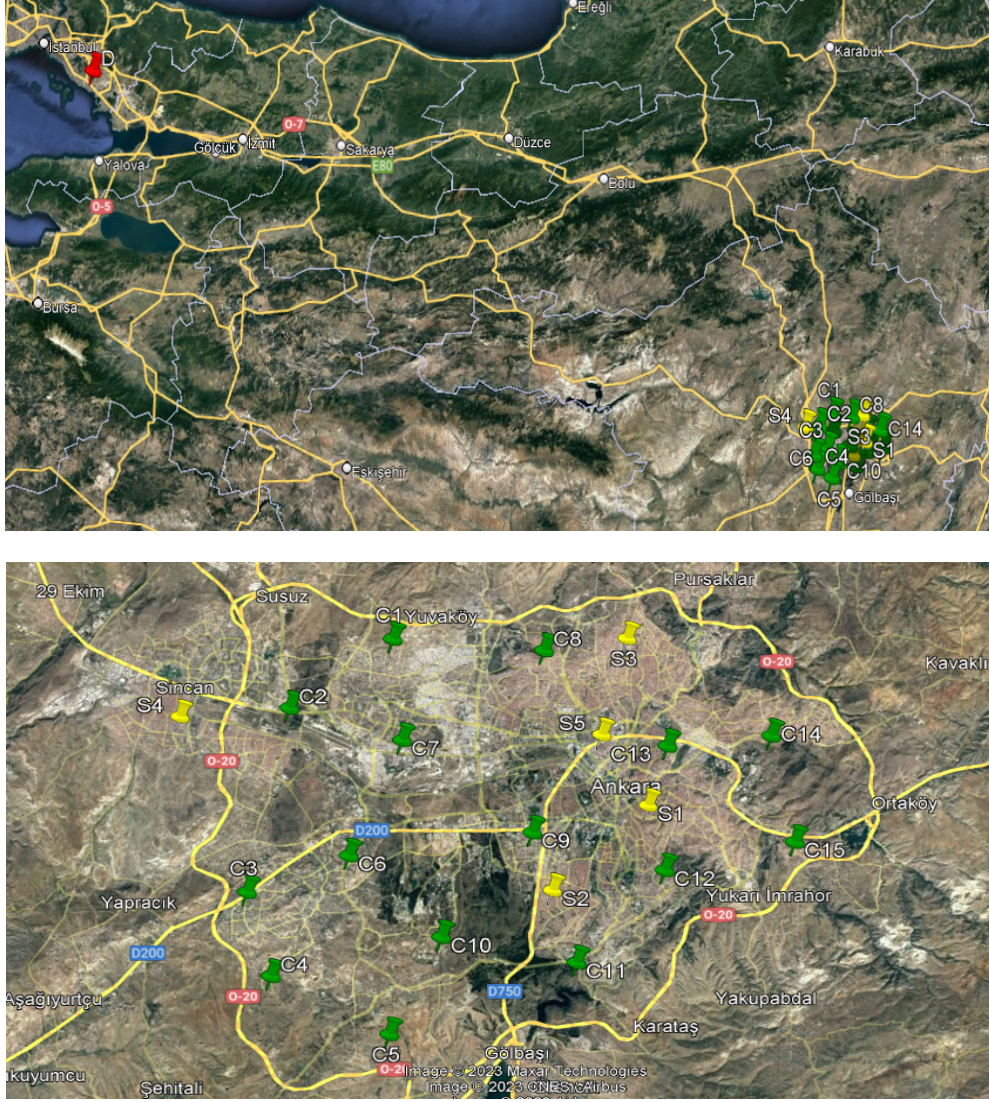
$$t_{c b u} \geq 0 \quad \forall (c, b) \in Y', u \in D_u \quad (32)$$

$$s_u \geq 0 \quad \forall u \in D_u \quad (33)$$

(12) ile verilen amaç fonksiyonu toplam yakıt tüketimini minimize etmek üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Fonksiyonun ilk kısmı birinci aşamadaki araçların, diğer kısmı ise ikinci aşamadaki araçların yakıt tüketimini ifade etmektedir. (13) kısıtları her bir uydu ve araç için akışın korunumunu sağlamaktadır. (14) kısıtları filodaki her bir aracın bir uyduyu yalnızca bir kez ziyaret edebileceğini ifade etmektedir. (15) – (17) kısıtları yaylardaki yük akışını ve araç kapasitelerini düzenleyen kısıtlardır. Birinci ve ikinci aşamadaki ürün akışları (18) kısıtları ile sağlanmaktadır. Dağıtım ağındaki her bir müşterinin sadece bir kez ziyaret edilebilmesi (19) kısıtları ile verilmektedir. (20) kısıtları dağıtımın ikinci aşamasında uydu ve müşterilerdeki akışın korunumunu düzenlemektedir. Uydulara yönelik trafiğin koordine edilmesi (21) kısıtları ile sağlanmaktadır. (22)-(23) kısıtları ikinci aşamada filodaki araç sayılarının aşılmamasına yönelik kısıtlardır. İkinci aşamada akışın korunumuna ve araç kapasitelerine yönelik kısıtlar (24)-(25) kısıtlarıdır. (26) kısıtları uydular için ürün akışını koordine etmektedir. Uydulardan yönlendirilen toplam ürün miktarının toplam talebe eşitlenmesi (27) kısıtları ile sağlanmaktadır. Karar değişkinlerinin tanımlamaları ise (28)-(33) kısıtları ile verilmektedir.

#### 4. Uygulama

Bu çalışmada Türkiye’de faaliyet gösteren bir ecza deposunun eczanelere tıbbi malzeme dağıtımını modellenmiştir. Firmanın Ankara ilindeki eczanelere ürün dağıtımını İstanbul’da yer alan merkezi depodan Ankara sınırlarında yer alan ara depolara, buralardan da şehirdeki ilgili eczanelere yönlendirilmesi vasıtasıyla yapılmaktadır. Dağıtım ağında 1 adet merkezi depo, 5 adet uydu (ara depo) ve 15 adet müşteri (eczane) yer almaktadır (bkz. Şekil 3). Görseldeki D merkezi depoyu, S1’den S5’e uydu noktalarını, C1’den C15’e müşteri noktalarını göstermektedir.



**Şekil 3.** Ecza Deposu İçin Dağıtım Ağının Gösterimi (Google Earth Pro)

Düğüm arasındaki mesafe ve süre verisi Google Earth Pro uygulaması vasıtasıyla elde edilmiştir. Hız verisi mesafenin süreye bölünmesiyle hesaplanmıştır. Mesafe ve hız matrisi sırasıyla Ek 1’de Tablo E1 ve Ek 2’de Tablo E2 ile sunulmaktadır. Eğim verisini elde etmek üzere dağıtım ağında yer alan her bir yay yaklaşık olarak birinci aşamada 10 km’lik; ikinci aşamada ise 2 km’lik uzunluklara ayrılmıştır. Parçaların eğimlerini hesaplamak üzere kullanılan parçanın başlangıç ve bitiş yükseklik verileri yine Google Earth Pro uygulaması vasıtasıyla elde edilmiştir. Araç kapasitelerini aşmayacak şekilde rastgele oluşturulan müşterilere yönelik talep miktarları (kg) C1’den C15’e sırasıyla 1.500, 1.000, 2.400, 1.800, 560, 1200, 2.360, 2.400, 1.300, 1.000, 800, 600, 400, 720 ve 250’dir. Toplam talep 18.320’dir. Müşteri taleplerini merkezi depodan uydulara taşımak üzere dağıtımın birinci kademesinde 2 adet; ikinci kademesinde uydulardan müşterilere taşımak üzere 8 adet araç bulunmaktadır. İkinci kademe araçlara nazaran daha büyük olan birinci kademe araçların her biri 9.668 kg taşıma kapasitesine, 8.332 kg boş ağırlığa ve toplamda 18.000 kg azami yüklü ağırlığa sahiptir. İkinci kademe araçların ise 2.422 kg taşıma kapasitesi, 2578 kg boş ağırlığı ve 5.000 kg azami yüklü ağırlığı bulunmaktadır. Filodaki araçların her biri kendi kademesinde homojendir. Araçlara yönelik teknik özellikler araç broşürlerinden temin edilmiştir. İkinci kademe araçlar S1, S2 ve S3 uydularında ikişer adet, S3 ve S4 uydularında birer adet olmak üzere kullanılabilir. Yakıt tüketimini hesaplamak için kullanılan araçlara yönelik teknik parametre değerleri Tablo 4 ile sunulmaktadır. Gramdan litreye dönüşüm faktörü olan  $\psi$  değeri 737 olarak baz alınmıştır.

**Tablo 4.** Araçların teknik parametre değerleri

Parametre	$\phi$	$k$	N	$V_s$	$\mu$	$\eta$	$\eta_{tf}$	g	$C_d$	$\rho$	$S_1$	$S_2$	$C_r$
Değer	1	0,2	33	5	44	0,6	0,45	9,81	0,4	1,2	9,98	2,82	0,01

## 5. Analiz sonuçları

Bu bölümde, iki aşamalı bir dağıtım ağında toplam yakıt tüketimini minimize etmek amacıyla yukarıda bahsedilen veri seti örneği ile ulaşılan analiz sonuçları sunulmaktadır. Ayrıca, eğim ve hız değerlerindeki değişimin etkisini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen duyarlılık analiz sonuçları paylaşılmaktadır. Optimum sonuçların elde edilmesinde SolverStudio ve Gurobi 10.0.0 programları, Intel (R) i7 işlemci 2.4 GHz hızında 6 GB belleğe sahip bir bilgisayar kullanılmıştır.

### 5.1. Temel durum analizi

Tüm yol boyunca eğimin sabit kalmayacağı gerçeğinin göz önünde bulundurulduğu ve bu bağlamda dağıtım ağındaki her bir yayın parçalara ayrılarak parçalar bazında yakıt tüketiminin dikkate alındığı modele yönelik elde edilen sonuçlar Tablo 5 ile verilmektedir.

**Tablo 5.** Temel duruma göre elde edilen optimum sonuçlar

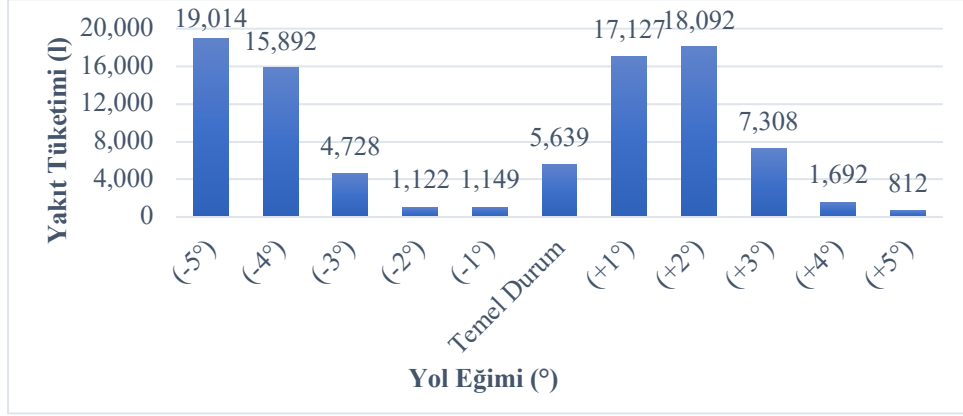
Aşama	Araç No	Araç Rotaları	Toplam Yakıt Tüketimi (l)
1. aşama	1	D-S4-S2-S5-D	5639,36
	2	D-S3-S1-D	
	1	S1-C9-C10-S1	
	2	S1-C11-C12-C15-C14-S1	
2. aşama	3	S2-C3-S2	
	4	S2-C5-C4-S2	
	5	S3-C1-C13-S3	
	6	S3-C8-S3	
	7	S4-C2-C6-S4	
	8	S5-C7-S5	

Sonuçlar incelendiğinde hem birinci hem de ikinci aşamada filoda bulunan tüm araçların kullanıldığı görülmektedir. Birinci aşamada merkezi depodan uydulara, son ziyaret edilen uydudan da tekrar merkezi depoya dönen 2 araç rotalanmaktadır. Dağıtım ağında yer alan tüm uyduların ürünleri nakletmek üzere çözümde yer aldığı gözlemlenmektedir. İkinci aşamada filoda yer alan 8 adet aracın tümü rotasına bir uydu noktasından başlamakta, bir ya da birden fazla müşteriyi ziyaret ettikten sonra yine başladığı uyduya geri dönmektedir. 3, 6 ve 8 numaralı araçlar, talebin ikincil kademe araç kapasitesine oldukça yakın olmasından dolayı, sırasıyla C3, C8 ve C7 müşterilerine olacak şekilde yalnızca tek bir müşteriye ürün dağıtımını yapmaktadırlar. Birinci ve ikinci kademedeki yakıt tüketimi dahil olmak üzere optimal toplam yakıt tüketimi 5.639,36 litredir.

### 5.2. Yol eğiminin etkisi

Çalışmanın bu bölümünde, eğim değerlerindeki artış ve azalışın araç rotaları ve toplam yakıt tüketimi üzerindeki etkisini irdelemek amacıyla her bir parçanın eğim değeri temel duruma göre  $-5^\circ$  ve  $+5^\circ$  aralığında artırılıp azaltılmıştır. İlgili eğim değerlerine yönelik optimum sonuçlar detaylı bir şekilde Ek 3'te Tablo E3 ile verilmektedir. Ayrıca, yol eğimine bağlı yakıt tüketimi değişimi özetle Şekil 3 ile gösterilmektedir. Yol eğiminde meydana gelen artış ve azalışlar hem yakıt tüketiminde hem de araç rotalarında değişime neden olmaktadır. Her

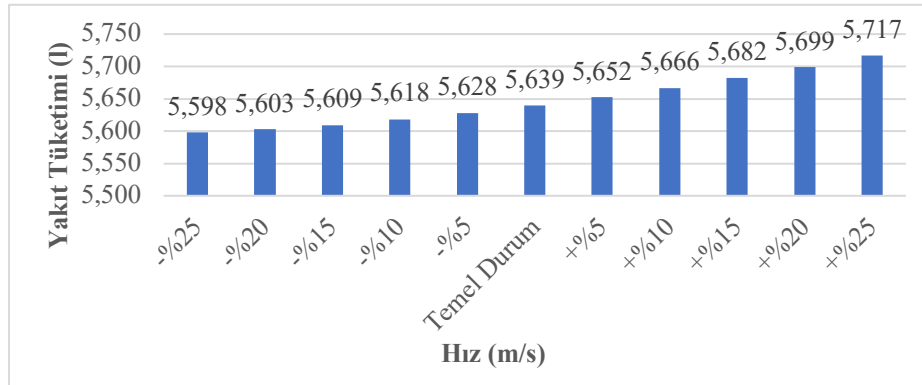
ne kadar yol eğimi arttığında veya azaldığında yakıt tüketiminin de benzer yönde değişeceği öngörülse de sonuçlar bu öngörüyle birebir uyuşmamaktadır. Eğimdeki 2°'ye kadar yapılan artış yakıt tüketiminde de görünür bir şekilde artışa sebep olmaktadır. 3° ve sonrasındaki eğim artışında yakıt tüketiminde azalış gözlemlenmektedir. Öte yandan, eğimdeki 2°'ye kadar yapılan azalışta yakıt tüketiminde azalış gözlemlenmekte iken eğim azalmaya devam ettikçe yakıt tüketimi artışa geçmektedir. Benzer sonuçların elde edildiği Wang ve diğ. (2015)'in çalışmasında bu durum şu şekilde açıklanmaktadır: Eğim artmaya devam ettikçe sürücü sabit bir seyir hızını korumak için gaz vermeye devam etmektedir. Bu durumda, yakıt tamamen yanmakta ve yüksek hızın ataleti aracı itmektedir. Bunun sonucunda da tüketilen yakıt azalmaktadır. Eğim azaldıkça sürücünün gaz verme ihtiyacı olmadığından yakıt tüketimi azalmaktadır. Eğim azalmaya devam ettikçe ise araç kendiliğinden hızlanmaya başlamakta ve kaymaktadır. Bunun sonucunda, sürücünün frenleme yapması ve hızdaki dalgalanmalar yakıt tüketiminde artışa neden olmaktadır.



Şekil 4. Yol eğimine bağlı yakıt tüketimi değişimi

### 5.3. Araç hızının etkisi

Araç hızındaki değişimin yakıt tüketimine etkisinin olup olmadığının veya nasıl etki ettiğinin araştırılması amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Hızdaki değişimin yakıt tüketimi üzerindeki etkisi, her bir yay üzerindeki hız parametresinin ( $h_{ij}$  ve  $h'_{c,b}$ ) temel durumdaki hıza göre -%25 ve +%25 aralığında değiştirilmesi yoluyla incelenmiştir. Detaylı sonuçlar Ek 4'te Tablo E4 ile verilmektedir. Hıza bağlı yakıt tüketimi değişimi grafiğinin gösterildiği Şekil 5'ten de görüleceği üzere, aracın hızı yakıt tüketimini etkileyen önemli etkenlerden biridir. Araç hızında gerçekleşen artış/azalış benzer yönde yakıt tüketiminde artış/azalışa sebep olmaktadır. Temel duruma göre hızdaki %5'ten %25'e azalış, yakıt tüketiminde sırasıyla %0,20, %0,38, %0,53, %0,65 ve %0,74 oranında azalış; hızdaki %5'ten %25'e artış ise sırasıyla %0,23, %0,48, %0,76, %1,05 ve %1,37 oranında artış yaratmaktadır. Bu bağlamda, daha düşük hızın daha az yakıt tüketimi, buna paralel olarak daha az emisyon salınımı sağladığı ve sürdürülebilirliğe olumlu yönde katkı sağladığı söylenebilmektedir. Böylece, sürücülerin olabildiğince yavaş araç kullanmaları ve agresif sürüş davranışlarından kaçınmaları, enerji verimliliği açısından ve dolayısıyla sürdürülebilirliğe katkıda bulunmaları açısından önem arz etmektedir.



Şekil 5. Hıza bağlı yakıt tüketimi değişimi

## 6. Sonuç ve öneriler

Gelecek nesiller için yaşanabilir bir dünya bırakma amacı olan sürdürülebilirlik kavramının artan önemi, kaynakların tükenmesine ve çevresel kirliliğe sebebiyet veren taşımacılıkta yakıt tüketimi ve/veya emisyon azaltımına yönelik kararların verilmesini ve uygulanmasını gerekli kılmaktadır. İlgili hesaplamaların olabildiğince gerçeği yansıtacak şekilde yapılması, uygun rotalama kararlarının verilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Yakıt tüketiminin ve/veya sera gazı emisyonlarının en aza indirilmesine yönelik rotalama çalışmalarında, yakıt tüketimi ve emisyon salınımını etkileyen önemli unsurlardan olan yol eğiminin yeterince dikkate alınmadığı gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, üzerinde durulan Y-2A-ARP'de ekolojik rotaların oluşturulması amacıyla, yakıt tüketimi hesaplamasında yol eğimi detaylı ve olabildiğince gerçeğe yakınlaştıracak şekilde dikkate alınmaktadır. Söz konusu amaçla, Türkiye'de faaliyet gösteren bir ecza deposunun dağıtım ağındaki tüm yollar (yaylar) belirli uzunluklarda parçalara ayrılmış ve her bir parçaya yönelik hesaplanan bu eğim değerleri ile araçların toplam yakıt tüketimi elde edilmiştir. Eğim ve hız faktörlerindeki değişimin yakıt tüketimi üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Eğimdeki değişimin etkisine yönelik inceleme her bir parçanın eğim değerinin temel duruma göre  $-5^\circ$  ve  $+5^\circ$  aralığında; hızdaki değişimin etkisine yönelik araştırma ise her bir yola ait hız parametresinin temel durumdaki hıza göre  $-25\%$  ve  $+25\%$  aralığında artırılıp azaltılması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Her iki analiz türünde de, temel duruma göre, optimal rotalarda ve toplam yakıt tüketiminde değişiklikler gözlemlenmiştir. Sanılanın aksine, eğimdeki artış araçların toplam yakıt tüketimini bir seviyeye kadar artırmış ( $+2^\circ$ ), bu seviyeden sonra giderek azalış gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, eğimdeki azalış toplam yakıt tüketimini bir seviyeye kadar azaltmış ( $-2^\circ$ ), bu seviyeden sonra giderek artışa sebep olmuştur. Benzer sonuçların elde edildiği literatürdeki çalışmada söz konusu durum şu şekilde açıklanmaktadır: Eğimin artması ile sürücünün sabit seyir hızını korumak amacıyla gaz vermeye devam etmesi, yakıtın tamamen yanmasını sağlamakta ve yüksek hızın ataleti aracı itmektedir. Söz konusu durum her ne kadar başlangıçta yakıt tüketimini artırsa da sonrasında yakıt tüketimi azalışa geçmektedir. Ters durumda ise eğimin azalması ile sürücünün gaz verme ihtiyacı giderek ortadan kalkmakta ve yakıt tüketimi azalmaktadır. Ancak, eğimin azalmaya devam etmesi ile aracın kendiliğinden hızlanması/kayması, sürücünün frenleme yapmasına ve hızda dalgalanmalara neden olmaktadır. Bu da yakıt tüketimini artırmaktadır. Öte yandan, yapılan hesaplamalar sonucunda, hızla bağlı yakıt tüketimi değişiminin hızdaki değişimle paralel olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer bir deyişle, yakıt tüketimi, hızdaki artışla artmış, hızdaki düşüşle azalmıştır. Hızın yakıt tüketimi, emisyon salınımı ve dolayısıyla enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulduğunda, sürücülerin olabildiğince yavaş araç kullanmaları ve agresif sürüş davranışlarından kaçınmaları gerektiği söylenebilmektedir.

Sonuç olarak, yol eğimi ve araç hızı, yakıt tüketimi ve dolayısıyla emisyon salınımını etkileyen önemli faktörlerdendir. Sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkıda bulunmak için bu faktörlerin dikkate alınarak rotalama kararlarının verilmesi gerekmektedir.

Araştırmacılar bu çalışmanın devamı olarak, daha büyük bir dağıtım ağında yakıt tüketimi hesaplamasını gerçeğe yakınlaştırmak adına eğimi daha küçük parçalar şeklinde dikkate alarak katkıda bulunabilirler.

### Araştırmacıların katkısı

Araştırmanın tüm süreçleri Ergül Kısa Toğrul tarafından yürütülmüştür.

### Çıkar çatışması

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.



## Kaynaklar

- Alinaghian, M., & Naderipour, M. (2016). A novel comprehensive macroscopic model for time-dependent vehicle routing problem with multi-alternative graph to reduce fuel consumption: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 210-222. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.029>
- Anderluh, A., Nolz, P. C., Hemmelmayr, V. C., & Crainic, T. G. (2021). Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and ‘grey zone’ customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 940-958. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.049>
- Asghari, M., & Al-e-hashem, S. M. J. M. (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 231, 107899. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107899>
- Babae Tirkolae, E., Hadian, S., & Golpira, H. (2019). A novel multi-objective model for two-echelon green routing problem of perishable products with intermediate depots. *Journal of Industrial Engineering And Management Studies*, 6(2), 196-213. doi: <https://doi.org/10.22116/JIEMS.2019.94158>
- Babagolzadeh, M., Shrestha, A., Abbasi, B., Zhang, S., Atefi, R., & Woodhead, A. (2019). Sustainable open vehicle routing with release-time and time-window: A two-echelon distribution system. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 571-576. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.219>
- Baldacci, R., Mingozzi, A., Roberti, R., & Calvo, R. W. (2013). An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Operations Research*, 61(2), 298-314. doi: <https://doi.org/10.1287/opre.1120.1153>
- Barth, M., Younglove, T., & Scora, G. (2005). Development of a heavy-duty diesel modal emissions and fuel consumption model. *UC Berkeley: California Partners for Advanced Transportation Technology*. doi: <https://escholarship.org/uc/item/67f0v3zf>
- Breunig, U., Schmid, V., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2016). A large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 76, 208-225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.06.014>
- Breunig, U., Baldacci, R., Hartl, R. F., & Vidal, T. (2019). The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 103, 198-210. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.11.005>
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009). Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transportation Science*, 43(4), 432-454. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0279>
- Cuda, R., Guastaroba, G., & Speranza, M. G. (2015). A survey on two-echelon routing problems. *Computers & Operations Research*, 55, 185-199. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.06.008>
- Dellaert, N., Dashty Saridarq, F., Van Woensel, T., & Crainic, T. G. (2016). Branch & price based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows. Technical report, CIRRELT-2016-45, Montreal, Kanada. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0844>
- Demir, E., Bektaş, T., & Laporte, G. (2014). A review of recent research on green road freight transportation. *European Journal Of Operational Research*, 237(3), 775-793. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.12.033>
- Doolan, R., & Muntean, G. M. (2016). EcoTrec—A novel VANET-based approach to reducing vehicle emissions. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(3), 608-620. doi: <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2585925>
- Dündar, H., Soysal, M., Ömürçönülşen, M., & Kanellopoulos, A. (2022). A green dynamic TSP with detailed road gradient dependent fuel consumption estimation. *Computers & Industrial Engineering*, 168, 108024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108024>
- Eitzen, H., Lopez-Pires, F., Baran, B., Sandoya, F., & Chicaiza, J. L. (2017). A multi-objective two-echelon vehicle routing problem. An urban goods movement approach for smart city logistics. *XLIII Latin American Computer Conference (CLEI)*, 4–8 Eylül, 1-10. doi: <https://doi.org/10.1109/CLEI.2017.8226454>
- Erdelic, T., & Caric, T. (2019). A survey on the electric vehicle routing problem: Variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*, 2019, 5075671. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5075671>
- Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics And Transportation Review*, 48(1), 100-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.08.001>
- Esmacili, M., & Sahraeian, R. (2019). Comparing two-echelon and single-echelon multi-objective capacitated vehicle routing problems. *Journal of Quality Engineering and Production Optimization*, 4(1), 1-16. Retrieved from [https://jqepo.shahed.ac.ir/article\\_893\\_131f8d60f21f37eb1d6c28f9f1c4c0e6.pdf](https://jqepo.shahed.ac.ir/article_893_131f8d60f21f37eb1d6c28f9f1c4c0e6.pdf)

- Fan, H., Zhang, Y., Tian, P., Lv, Y., & Fan, H. (2021). Time-dependent multi-depot green vehicle routing problem with time windows considering temporal-spatial distance. *Computers & Operations Research*, 129, 105211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105211>
- Fan, P., Song, G., Zhu, Z., Wu, Y., Zhai, Z., & Yu, L. (2022). Road grade estimation based on Large-scale fuel consumption data of connected vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 106, 103262. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103262>
- Gonzalez-Feliu, J. (2008). *Models and methods for the city logistics: The two-echelon capacitated vehicle routing problem* (Doctoral dissertation). Politecnico di Torino, Turin, Italy. Retrieved from <https://theses.hal.science/tel-00844731/>
- Grangier, P., Gendreau, M., Lehuède, F., & Rousseau, L. M. (2016). An adaptive large neighborhood search for the two-echelon multiple-trip vehicle routing problem with satellite synchronization. *European Journal of Operational Research*, 254(1), 80-91. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.040>
- Hooker, J. N. (1988). Optimal driving for single-vehicle fuel economy. *Transportation Research Part A: General*, 22(3), 183-201. doi:[https://doi.org/10.1016/0191-2607\(88\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0191-2607(88)90036-2)
- Jepsen, M., Spoorendonk, S., & Ropke, S. (2013). A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, 47(1), 23-37. doi:<https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0399>
- Jie, W., Yang, J., Zhang, M., & Huang, Y. (2019). The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, 272(3), 879-904. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.002>
- Kamal, M. A. S., Mukai, M., Murata, J., & Kawabe, T. (2011). Ecological vehicle control on roads with up-down slopes. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3), 783-794. doi:<https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2112648>
- Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2019). Multi-depot two-echelon fuel minimizing routing problem with heterogeneous fleets: model and heuristic. *Networks and Spatial Economics*, 19, 969-1005. doi:<https://doi.org/10.1007/s11067-018-9437-7>
- Kang, L., Shen, H., & Li, Z. (2019). Road gradient estimation using smartphones: Towards accurate estimation on fuel consumption and air pollution emission on roads. *IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Dallas, TX, Amerika, Temmuz, 768-777. doi:<https://doi.org/10.1109/ICDCS.2019.00081>
- Lai, D., Costa, Y., Demir, E., Florio, A., & Van Woensel, T. (2021). The pollution-routing problem with speed optimization and uneven topography. arXiv preprint arXiv:2105.09229. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.09229>
- Li, H., Yuan, J., Lv, T., & Chang, X. (2016). The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems considering carbon dioxide emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 49, 231-245. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.002>
- Li, H., Liu, Y., Jian, X., & Lu, Y. (2018). The two-echelon distribution system considering the real-time transshipment capacity varying. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 239-260. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.02.015>
- Liu, R., Tao, Y., Hu, Q., & Xie, X. (2017). Simulation-based optimisation approach for the stochastic two-echelon logistics problem. *International Journal of Production Research*, 55(1), 187-201. doi:<https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201221>
- Liu, D., Deng, Z., Mao, X., Yang, Y., & Kaisar, E. I. (2020). Two-echelon vehicle-routing problem: optimization of autonomous delivery vehicle-assisted E-grocery distribution. *IEEE Access*, 8, 108705-108719. doi:<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001753>
- Liu, L., & Liao, W. (2021). Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective. *Waste Management*, 120, 400-414. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.045>
- Liu, D., Yang, H., Mao, X., Antonoglou, V., & Kaisar, E. I. (2023). New mobility-assist e-grocery delivery network: a load-dependent two-echelon vehicle routing problem with mixed vehicles. *Transportation Research Record*, 2677(1), 294-310. doi: <https://doi.org/10.1177/036119812210992>



- Pamucar, D., Gigovic, L., Cirovic, G., & Regodic, M. (2016). Transport spatial model for the definition of green routes for city logistics centers. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 72-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.09.002>
- Paul, A., Kumar, R. S., Rout, C., & Goswami, A. (2021). A bi-objective two-echelon pollution routing problem with simultaneous pickup and delivery under multiple time windows constraint. *Opsearch*, 1-32. doi:<https://doi.org/10.1007/s12597-020-00481-6>
- Perboli, G., Tadei, R., & Vigo, D. (2011). The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. *Transportation Science*, 45(3), 364-380. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0368>
- Perboli, G., Tadei, R., & Fadda, E. (2018). New valid inequalities for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 75-84. doi:<https://doi.org/10.1016/j.endm.2018.01.009>
- Rao, W., Liu, F., & Wang, S. (2016). An efficient two-objective hybrid local search algorithm for solving the fuel consumption vehicle routing problem. *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 2016, 3713918. doi:<https://doi.org/10.1155/2016/3713918>
- Reinaldi, M., Redi, A. A. N. P., Prakoso, D. F., Widodo, A. W., Wibisono, M. R., Supranartha, A., Liperda, R. I., Nadlifatin, R., Prasetyo, Y. T., & Sakti, S. (2021). Solving the two echelon vehicle routing problem using simulated annealing algorithm considering drop box facilities and emission cost: a case study of reverse logistics application in Indonesia. *Algorithms*, 14(9), 259. doi: <https://doi.org/10.3390/a14090259>
- Schröder, M., & Cabral, P. (2019). Eco-friendly 3D-Routing: A GIS based 3D-Routing-Model to estimate and reduce CO2-emissions of distribution transports. *Computers, Environment and Urban Systems*, 73, 40-55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.08.002>
- Scora, G., Boriboonsomsin, K., & Barth, M. (2015). Value of eco-friendly route choice for heavy-duty trucks. *Research in Transportation Economics*, 52, 3-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.002>
- Sluijk, N., Florio, A. M., Kinable, J., Dellaert, N., & Van Woensel, T. (2023). Two-echelon vehicle routing problems: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 304, 865-886. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.022>
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Bektaş, T. (2015). The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, 164, 366-378. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.11.016>
- Soysal, M., Çimen, M., & Demir, E. (2018). On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1664-1678. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.040>
- Sun, J., & Wang, R. (baskıda). Multi-objective optimization of a sustainable two echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery in construction projects. *Journal of Engineering Research*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.10.033>
- Web of Science Core Collection. Erişim adresi: <https://www.webofscience.com>, Erişim tarihi: Nisan 2023.
- Wang, Y., Du, X., Yu, H., Huang, J., & Li, Y. (2015). Impacts of road grade on fuel consumption of light vehicles by use of Google Earth DEM. *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery*, Xi'an, Çin, Eylül, 360-363. doi:<https://doi.org/10.1109/CyberC.2015.73>
- Wang, K., Lan, S., & Zhao, Y. (2017). A genetic-algorithm-based approach to the two-echelon capacitated vehicle routing problem with stochastic demands in logistics service. *Journal of the Operational Research Society*, 68, 1409-1421. doi:<https://doi.org/10.1057/s41274-016-0170-7>
- Wang, Y., Zhang, S., Assogba, K., Fan, J., Xu, M., & Wang, Y. (2018). Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization. *Journal of Cleaner Production*, 197, 443-461. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.208>
- Wang, Z., & Wen, P. (2020). Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window. *Sustainability*, 12(5), 1967. doi:<https://doi.org/10.3390/su12051967>
- Wang, Y., Yuan, Y., Guan, X., Xu, M., Wang, L., Wang, H., & Liu, Y. (2020). Collaborative two-echelon multicenter vehicle routing optimization based on state-space-time network representation. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120590>

Zhou, L., Baldacci, R., Vigo, D., & Wang, X. (2018). A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, 265(2), 765-778. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011>

## Ek 1

Tablo E1. Düğümler arasındaki mesafe matrisi (m)

Düğümler	D	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	
D	-	418.000	420.000	412.000	401.000	415.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	424.000	-	10.200	13.500	28.200	5.100	18.900	23.200	26.000	29.900	23.000	18.800	14.800	12.200	10.300	20.800	9.800	4.300	5.600	9.400	9.600	
S2	425.000	10.000	-	17.400	27.900	10.900	20.200	23.700	20.900	20.700	14.400	15.300	15.300	16.800	6.100	15.800	4.300	11.300	14.600	19.200	23.100	
S3	419.000	12.300	17.400	-	32.800	7.300	15.600	30.900	29.100	34.800	30.900	23.200	17.200	4.900	13.000	24.000	20.200	17.100	7.900	11.000	18.000	
S4	388.000	27.600	26.300	30.700	-	25.000	15.800	5.400	16.800	22.500	27.600	15.600	14.500	26.700	23.200	24.800	35.100	32.200	28.800	33.400	38.700	
S5	421.000	5.900	11.200	7.800	25.100	-	14.800	19.500	23.000	28.700	24.800	17.100	11.100	8.100	7.300	17.900	13.500	9.800	4.300	9.600	14.900	
C1	-	18.800	20.000	15.600	17.200	15.200	-	11.600	20.000	25.700	26.100	14.100	6.800	10.000	16.300	23.300	27.100	23.400	21.200	29.600	31.100	
C2	-	23.000	22.300	25.100	5.600	19.700	8.500	-	18.500	24.000	25.000	13.000	8.900	24.100	19.600	22.500	29.500	27.600	23.400	28.000	33.300	
C3	-	25.400	19.800	29.300	15.500	22.800	19.500	15.000	-	6.000	12.700	7.100	15.200	27.500	16.700	12.000	22.100	28.000	26.500	31.100	36.400	
C4	-	28.600	22.300	32.000	21.700	24.700	22.300	21.100	6.400	-	11.000	10.200	18.000	29.800	19.400	12.900	20.000	26.600	29.200	33.800	35.100	
C5	-	22.700	16.300	31.100	28.800	24.500	25.100	26.200	12.900	11.500	-	12.900	20.700	31.500	20.200	9.200	14.000	20.600	28.300	32.800	29.000	
C6	-	18.800	13.900	24.100	14.700	18.200	13.200	14.200	6.300	9.600	12.100	-	8.900	21.400	10.800	9.000	19.100	24.700	21.300	25.800	28.800	
C7	-	15.500	14.800	17.600	14.400	12.200	6.400	8.900	14.500	18.100	20.600	8.600	-	12.600	12.100	18.100	22.000	20.100	15.900	20.500	25.800	
C8	-	12.500	16.200	5.100	27.100	8.200	10.300	21.600	26.700	33.400	30.900	21.100	12.400	-	12.200	22.600	24.600	16.400	10.000	14.800	20.100	
C9	-	7.400	5.100	14.400	23.900	7.900	16.200	19.900	16.900	22.600	18.600	11.300	11.500	13.700	-	11.800	11.300	11.700	11.600	16.200	21.500	
C10	-	20.100	14.500	24.000	26.700	17.500	23.000	24.100	12.700	14.300	9.300	10.100	18.100	22.700	11.400	-	16.300	22.800	21.200	25.800	31.100	
C11	-	9.600	4.600	23.700	34.300	13.700	26.100	29.600	22.500	20.200	14.000	19.000	21.200	24.800	10.700	18.400	-	7.500	20.900	20.400	16.000	
C12	-	4.500	10.300	16.600	32.400	9.300	22.700	29.800	34.900	26.800	20.600	29.300	19.100	16.500	10.500	25.000	7.400	-	8.600	11.800	10.400	
C13	-	5.600	14.700	8.100	29.400	4.100	18.100	23.400	26.600	32.300	28.400	20.700	15.000	9.600	10.800	21.400	16.000	8.700	-	6.000	11.400	
C14	-	10.200	18.800	12.000	33.000	9.700	22.700	27.400	30.600	36.300	32.300	24.700	19.000	14.100	14.900	25.500	20.200	15.600	5.300	-	9.000	
C15	-	10.500	21.100	17.700	38.600	15.300	28.300	33.000	36.200	35.500	29.300	30.300	24.600	19.700	20.500	31.100	16.100	11.500	10.900	9.200	-	

## Ek 2

Tablo E2. Dügümler Arasındaki Hız Matrisi (m/s)

Dügümler	D	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
D	-	26,39	26,62	26,61	27,06	26,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
S1	26,77	-	8,10	9,78	13,06	7,08	10,16	14,87	14,94	13,47	11,27	12,05	11,75	7,82	10,10	12,38	7,42	7,96	6,67	8,25	8,42
S2	27,14	8,77	-	12,61	16,03	13,97	10,86	17,17	16,59	12,32	12,00	15,00	14,17	11,20	7,82	10,97	7,17	9,42	14,31	14,55	13,28
S3	27,39	10,25	12,61	-	15,62	10,14	10,00	18,39	15,65	15,26	13,92	14,32	10,62	6,81	12,04	13,33	9,90	9,19	9,40	7,97	13,64
S4	26,18	13,53	13,70	15,51	-	13,89	10,97	10,00	16,47	15,63	12,43	11,82	12,08	15,34	13,33	13,33	16,25	12,48	15,48	13,58	14,66
S5	27,30	7,56	12,44	10,00	15,49	-	10,72	17,11	16,67	15,94	14,76	15,00	13,21	8,44	12,17	14,21	9,00	8,17	8,96	13,33	15,52
C1	-	10,80	13,33	9,63	13,03	10,13	-	11,37	13,33	12,24	11,45	11,19	8,72	8,77	9,70	13,39	14,57	10,26	13,09	15,91	14,81
C2	-	16,67	17,70	16,73	11,67	17,28	8,85	-	20,56	18,18	13,44	16,67	13,48	18,26	16,33	15,00	18,21	13,94	17,73	17,28	17,90
C3	-	15,68	17,37	15,75	16,15	16,52	13,54	20,83	-	11,11	10,58	8,45	15,83	15,28	16,37	11,11	12,70	12,96	16,99	17,28	17,84
C4	-	14,02	14,29	13,68	14,47	14,20	11,26	17,58	10,67	-	10,78	10,63	12,00	13,07	13,47	11,94	12,35	13,04	14,31	14,82	13,60
C5	-	12,20	12,94	14,01	13,33	14,58	11,31	13,65	10,24	10,65	-	10,24	11,90	13,13	14,03	9,02	12,28	12,72	15,22	15,19	13,81
C6	-	14,24	14,48	14,35	12,89	16,85	11,00	14,79	8,75	11,43	11,20	-	12,36	13,72	12,86	10,71	12,73	13,28	16,14	15,93	16,00
C7	-	12,92	14,51	11,73	13,33	13,56	8,21	14,83	15,10	13,12	11,84	11,94	-	10,00	11,86	14,37	15,28	11,55	13,95	14,86	15,93
C8	-	9,47	11,25	6,54	16,13	9,11	9,54	16,36	14,83	15,05	13,21	13,53	10,33	-	9,68	12,99	13,23	8,82	9,80	11,21	12,88
C9	-	9,49	9,44	12,00	15,93	11,97	11,74	16,58	16,57	15,69	14,09	14,49	13,69	10,38	-	12,29	13,45	9,29	13,81	14,21	15,58
C10	-	13,40	14,22	13,79	15,89	14,58	13,69	16,74	11,14	11,92	8,61	10,52	14,37	13,51	13,57	-	10,87	11,52	15,36	15,36	16,20
C11	-	8,00	6,97	14,63	15,88	12,69	13,59	15,91	14,42	12,95	12,96	13,77	15,36	13,33	12,74	13,33	-	9,62	16,59	13,60	12,70
C12	-	7,50	9,54	9,22	13,85	7,38	9,96	14,19	19,39	13,14	13,21	18,78	10,98	8,09	9,72	13,89	11,21	-	6,83	10,35	11,56
C13	-	6,67	11,14	9,00	15,81	7,59	10,77	14,44	16,42	11,22	11,83	14,38	11,90	8,42	10,59	12,30	10,26	6,90	-	12,50	15,83
C14	-	8,10	14,24	11,76	16,18	14,70	11,13	16,91	17,59	13,15	14,17	16,47	15,08	11,19	14,61	15,18	14,03	13,68	11,04	-	13,64
C15	-	8,33	13,02	13,41	15,32	15,94	13,48	17,19	17,24	14,09	13,95	16,83	15,77	12,63	15,53	12,96	12,78	11,98	13,97	13,94	-

## Ek 3

Tablo E3. Eğim değerlerine göre optimal çözüm sonuçları

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(-5°)	1. aşama	D-S2-S5-S3-D	19.013,93	237,16
		D-S4-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C12-C15-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(-4°)	1. aşama	D-S3-S5-S4-D	15.892,43	181,81
		D-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C15-C12-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C4-C5-S2		
		S3-C7-S3		
		S3-C8-S4		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C9-C10-S5		
(-3°)	1. aşama	D-S3-S2-D	4.727,99	-16,16
		D-S5-S1-S4-D		
		S1-C1-C11-S1		
		S1-C12-C13-C14-C15-S1		
		S2-C5-C4-S2		
	2. aşama	S2-C9-C10-S2		
		S3-C3-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
(-2°)	1. aşama	D-S2-S3-D	1.122,04	-80,10
		D-S4-S1-S5-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C7-S1		
		S2-C5-C10-C11-S2		
	2. aşama	S2-C12-C1-S2		
		S3-C2-C6-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C9-C14-C15-S5		

Tablo E3'ün devamı

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(-1°)	1. aşama	D-S1-S2-D	1.149,29	-79,62
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C7-S1		
		S2-C1-C12-S2		
	2. aşama	S2-C11-C10-C5-S2		
		S3-C2-C9-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C6-C15-C14-S5		
(±1°)	1. aşama	D-S3-S5-S1-D	17.126,98	203,70
		D-S4-S2-S1-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C12-C15-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(±2°)	1. aşama	D-S2-S1-D	18.091,75	220,81
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C11-C1-S1		
		S1-C14-C13-C15-C12-S1		
		S2-C4-C5-S2		
	2. aşama	S2-C10-C6-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C9-C2-S3		
		S4-C3-S4		
		S5-C7-S5		
(±3°)	1. aşama	D-S3-S2-D	7.307,66	29,58
		D-S5-S1-S4-D		
		S1-C1-C11-S1		
		S1-C12-C13-C14-C15-S1		
		S2-C5-C4-S2		
	2. aşama	S2-C9-C10-S2		
		S3-C7-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C3-S5		

Tablo E3'ün devamı

Eğimdeki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
(+4°)	1. aşama	D-S1-S3-D	1.691,59	-70
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C7-S1		
		S1-C9-C14-C15-S1		
		S2-C2-C6-S2		
	2. aşama	S2-C5-C10-C11-S2		
		S3-C8-S3		
		S3-C12-C1-S3		
		S4-C13-C4-S4		
		S5-C3-S5		
(+5°)	1. aşama	D-S1-S2-D	812,37	-85,59
		D-S3-S5-S4-D		
		S1-C3-S1		
		S1-C4-C13-S1		
		S2-C1-C12-S2		
	2. aşama	S2-C7-S2		
		S3-C2-C9-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C5-C10-C11-S4		
		S5-C6-C14-C15-S5		

\* Değişim (%), temel duruma göre yakıt tüketimindeki yüzdesel artış/azalışı belirtmektedir.

## Ek 4

Tablo E4. Hız değerlerine göre optimal çözüm sonuçları

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)				
-%25	1. aşama	D-S3-S1-D	5.597,66	-0,74				
		D-S4-S2-S5-D						
		S1-C9-C10-S1						
		S1-C11-C12-C15-C14-S1						
		S2-C3-S2						
	2. aşama	S2-C5-C4-S2						
		S3-C1-C13-S3						
		S3-C8-S3						
		S4-C2-C6-S4						
		S5-C7-S5						
		-%20			1. aşama	D-S3-S1-D	5.602,70	-0,65
						D-S4-S2-S5-D		
						S1-C9-C10-S1		
						S1-C11-C12-C15-C14-S1		
S2-C3-S2								
2. aşama	S2-C5-C4-S2							
	S3-C1-C13-S3							
	S3-C8-S3							
	S4-C2-C6-S4							
	S5-C7-S5							
	-%15		1. aşama	D-S3-S1-D	5.609,45	-0,53		
				D-S4-S2-S5-D				
				S1-C9-C10-S1				
				S1-C11-C12-C15-C14-S1				
S2-C3-S2								
2. aşama		S2-C5-C4-S2						
		S3-C1-C13-S3						
		S3-C8-S3						
		S4-C2-C6-S4						
		S5-C7-S5						
		-%10	1. aşama	D-S3-S1-D			5.617,92	-0,38
				D-S4-S2-S5-D				
				S1-C9-C10-S1				
				S1-C11-C12-C15-C14-S1				
S2-C3-S2								
2. aşama	S2-C5-C4-S2							
	S3-C1-C13-S3							
	S3-C8-S3							
	S4-C2-C6-S4							
	S5-C7-S5							



Tablo E4'ün devamı

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
-%5	1. aşama	D-S3-S1-D	5.627,88	-0,20
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%5	1. aşama	D-S3-S1-D	5.652,14	0,23
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%10	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.666,43	0,48
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%15	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.682,06	0,76
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		

Tablo E4'ün devamı

Hızdaki Değişim	Aşama	Araç Rotaları	Yakıt Tüketimi (l)	Değişim (%)
+%20	1. aşama	D-S4-S2-S5-D	5.698,85	1,05
		D-S3-S1-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		
+%25	1. aşama	D-S3-S1-D	5.716,75	1,37
		D-S4-S2-S5-D		
		S1-C9-C10-S1		
		S1-C11-C12-C15-C14-S1		
		S2-C3-S2		
	2. aşama	S2-C5-C4-S2		
		S3-C1-C13-S3		
		S3-C8-S3		
		S4-C2-C6-S4		
		S5-C7-S5		

\* Değişim (%), temel duruma göre yakıt tüketimindeki yüzdesel artış/azalışı belirtmektedir.



# Journal of Turkish Operations Management

## Assessment of sustainable aviation fuel production methods using a hybridized decision-making framework

İbrahim Temam İbrahim<sup>1</sup>, Ali Osman Kuşakcı<sup>2</sup> and Amna Abdullah\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Graduate Studies, Department of Air Transport Management, Ibn Haldun University, Turkey, email: [ibrahim.temam@stu.ihu.edu.tr](mailto:ibrahim.temam@stu.ihu.edu.tr), ORCID No: <http://orcid.org/0009-0003-4902-3297>

<sup>2</sup>School of Business, Department of Management, Ibn Haldun University, Turkey, email: [aliosman.kusakci@ihu.edu.tr](mailto:aliosman.kusakci@ihu.edu.tr), ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-1411-0369>

<sup>3</sup>School of Graduate Studies, Department of Management, Ibn Haldun University, Turkey, email: [amna.faisal@stu.ihu.edu.tr](mailto:amna.faisal@stu.ihu.edu.tr), ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9422-5144>

\* Corresponding author

### Article Info

#### Article History

Received: 19.12.2023  
Revised: 04.03.2024  
Accepted: 31.03.2024

#### Keywords

Aviation  
Green fuel  
Sustainable Aviation Fuel  
PROMETHEE II  
Bio Fuels

### Abstract

Sustainable aviation fuels (SAF) present a feasible solution to decarbonize modern aviation. Unlike traditional jet fuels, SAFs are produced in a variety of ways, thereby choosing one of these processes is a complicated Multi-Criteria Decision Making (MCDM) challenge that involves conflicting priorities. This study evaluates SAF production processes using a multicriteria methodology, PROMETHEE II. With SAF technology in its nascent stage and limited data, several stakeholders in the aviation sector were enlisted to assist in the collection of data and preferences. The suggested framework's strength lies in its adaptability to suit the subjective opinions of diverse stakeholders, selection of a ranking system, and robustness of outcomes. This research engaged stakeholders in a participatory manner to rank 11 (A1 to A11) SAF production paths based on 24 parameters categorized into social, environmental, economic, and technological evaluation criteria. Industry professionals were given a form to rate SAF production methods according to a performance criterion. Data is validated using fuzzy TOPSIS, fuzzy VIKOR, and PROMETHEE II to reduce professionals' judgmental personal prejudice. Results indicate the optimal feedstock for SAF production is the direct transition process of CO<sub>2</sub> to SAF (A11) in the gasification or Fischer-T synthesis group.

### 1. Introduction

The air transportation sector has grown exponentially in recent years, contributing to substantial economic benefits and increased employment worldwide (IATA, 2019). However, this boon also brings about ecological concerns, primarily due to greenhouse gas emissions (GHG), of which carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) holds significant responsibility, accounting for approximately 53% of the overall greenhouse gas effect. Even though the airline industry is responsible for just 2%-2.6% of annual global CO<sub>2</sub> emissions, the ramifications of these emissions disproportionately impact the environment (ICAO, 2016; Kivits et al., 2010).

The International Air Transport Association (IATA) foresees that by 2035, global passenger counts will grow substantially. As a result, by 2050, the airline sector may contribute between 4.6% and 20.2% to global fossil fuel CO<sub>2</sub> emissions (O'Connell et al., 2019). Decarbonizing the aviation industry hinges on technological innovations and operational advancements. Potential solutions include refined aviation designs, propulsion

systems, and considering the potential of electrifying long-haul planes. However, electric planes might not be commercially viable until around 2050 (Schäfer et al., 2018).

Two of the most important methods for cutting emissions are the use of Sustainable Aviation Fuels (SAF) and planned optimal flight itineraries (Bann et al., 2017). SAF is seen as a calculated method of cutting emissions and decreasing dependency on fossil resources. These fuels play a pivotal role in emission control and reducing dependency on fossil fuels (The Royal Society, 2019). Given the lack of technical preparedness in alternative options, liquid fuels will remain to serve a central role in flight operations. Therefore, the utilization of SAF is viewed as a moderate strategic plan for controlling emissions and lowering reliance on fossil fuels. Thus far, the production of SAF poses significant challenges; ranging from technological hindrances, public perceptions, technological unpredictability, societal attitudes, ecological consequences, financial considerations and environmental implications of production and distribution, to economic barriers (Bann et al., 2017; Wang et al., 2019). Despite the crucial role of SAF in the future of aviation, current literature indicates a lack of research focusing on SAF production techniques (Dožić, 2019). Addressing this gap, the present study introduces a participative model based on a multi-criteria decision framework.

### *Purpose of the Study*

The research aims to delve into the multifaceted realm of sustainable aviation fuel (SAF) production and its implications within the aviation industry. By drawing insights from various feedstock options, production methodologies, economic feasibilities, and environmental impacts of SAF, the study seeks to offer a comprehensive understanding of the potential adoption of biofuels in aviation (Hileman & Stratton, 2014; Lokesh et al., 2015; Wang et al., 2019). Through an exploration of the hydrocarbon composition, thermodynamic properties, and combustion effects of different SAF types in comparison to traditional aviation fuel sources like camelina, jatropha, and microalgae-derived fuels, the research endeavours to shed light on the viability and performance characteristics of biofuels (Moore et al., 2017).

Furthermore, the investigation may encompass an analysis of stakeholder attitudes towards biofuels, an assessment of the socioeconomic ramifications of aviation biofuel production, an evaluation of life cycle greenhouse gas emissions, and an exploration of the feasibility and profitability of diverse biofuel supply chains (Bann et al., 2017; Zemanek et al., 2020). By synthesizing findings from a spectrum of studies on biofuels, feedstocks, production techniques, and stakeholder perceptions, the research aspires to address pivotal challenges in transitioning towards sustainable aviation practices, encompassing technological advancements, policy implications, economic considerations, and environmental sustainability (Kolosz et al., 2020; Zhang, Fang, et al., 2020). Ultimately, the study aims to contribute valuable insights to propel the utilization of bio-aviation fuels and advocate for a more sustainable trajectory for the aviation sector (Chiaromonti, 2019).

By combining a literature review with industry insights, a framework has been developed to prioritize sustainable aviation fuel production paths based on social, environmental, economic, and technological criteria (Shahabuddin et al., 2020). The study aims to bridge the gap in research by offering a comprehensive assessment approach for sustainable aviation fuel production methods, utilizing a multi-criteria decision framework to inform decision-making in the industry (Gegg & Wells, 2017). This model incorporates insights from aviation industry experts regarding low-carbon aviation fuel production. Moreover, expert opinions were harnessed to ascertain each criterion's relative importance and rank alternative SAF production methods. Employing this data, the study simulated professional preferences to prioritize SAF production pathways. Notably, the research also juxtaposed the multi-criteria ranking results using various Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques.

The remaining of this study is organized as follows. Section 2 provides a literature review on SAF while Section 3 briefly addresses different production methods. Next, the research methodology is introduced in Section 4. Section 5 presents the main findings of the research and provides an analysis of the results. Finally, Section 6 culminates with conclusive remarks.

## **2. Literature review**

The literature review is structured according to research examining societal, environmental, economic, and technological aspects. Chiaromonti, (2019) underlined the challenges and prospects for sustainable fuel adoption while. Kivits et al., (2010) studied the significance of airports in aiding cleaner aviation. Wang et al., (2019) examined the production impacts of airline fuels in a Brazilian economic system and found favorable

socioeconomic outcomes for employment and Gross domestic product on balance. O'Connell et al., (2019) prioritized energy efficiency and reduced greenhouse gas (GHG) emissions as the two important factors and found that some Sustainable aviation fuel conversion methods are more energy-intensive than others, excluding those that utilize trash and leftovers as feedstock.

Moreover, Staples et al., (2018) examined emission reductions resulting from the manufacture of SAF using non-food feedstocks via several conversion methods across their whole life cycle. It revealed that annual investments of approx. 12B USD will be required to reduce it by at least 50% by 2050. Besides, Ganguly et al., (2018) performed a Life Cycle Assessment (LCA) on a wood-related feedstock for SAF manufacturing. It was discovered that this type of SAF can reduce global warming by 78% as compared to traditional aviation fuel. Seber et al., (2014) utilized LCA to determine the GHG discharge reductions and manufacturing expenses related to Hydro-processed Esters and Fatty Acids (HEFA). It was discovered that LCA of green fuel derived from yellow grease created fewer GHG emissions than sustainable aviation fuel derived from tallow when compared with aviation fuel derived from petroleum.

Furthermore, Bann et al., (2017) used a financial technique to determine the most suited SAF production process from an economic standpoint. They employed stochastic modelling focused on a net current value computation for six alternative approaches to defining the minimal selling price of sustainable aviation fuels. In addition, it was found that SAF produced using vegetable oil-based feedstocks is more comparable in price to standard aviation fuel than SAF derived from non-food feedstocks. Trivedi et al., (2015) found that the gasification or FT production method is more financially feasible when compared to the hybrid method by focusing on energy investment return analysis intended for Fischer-Tropsch, hydro-processed ester, and fatty acids, & improved fermentation procedures utilizing various feedstock.

Neuling & Kaltschmitt, (2018) found that the FT procedure with switchgrass yielded the highest energy ROI at 9.8% through a techno-economic assessment, including environmental factors for SAF production paths, concluding that such operations use the mass and energy balance method. Achieving technological, economic, and environmental objectives concurrently for a single method is not possible. Li et al., (2018) found that the production parameters analyzed, the minimum selling price (MSP) of sustainable aviation fuel ranged from \$0.40 to \$0.17 per liter, with feedstock expenditure being the most sensitive factor. Michailos, (2018) also conducted a thorough production design and cost evaluation of sustainable aviation fuel from sugar cane residual (bagasse). It was discovered that one kilogram of dry bagasse may create 0.121 kilograms of sustainable aviation fuel at a rate of \$2.78 per liter.

Furthermore, Lokesh et al., (2015) explored the effects of sustainable aviation fuel hydrocarbon composition, thermodynamic characteristics, & fuel combustion on airplane performances studied three alternative SAFs and compared them to standard aviation fuel, including camelina, jatropha, as well as microalgae. Hileman & Stratton, (2014) focused on many criteria to evaluate the viability of various sources of fuels for the airline industry and showed that the fuels obtained from the Fischer Tropsch & HEFA procedures were shown to be practical for supplementing the existing aviation fuel supplies. However, hydrogen is deemed impracticable because of airplanes' existing engine technology. None of the studies employs the multi-criteria decision-making conceptual approach, which is gradually being introduced into the Life cycle assessment or techno-economic assessment toolbox as a definitive endpoint approach, notwithstanding the issue reasoning reflecting a multi-criteria dilemma.

This research intends to address this disparity by presenting an investors' participative Multi criteria decision structure that addresses the opinions of airline-experienced professionals on lower-carbon aviation energy production approaches.

### *Importance and Contribution of the Study*

In the academic literature on sustainable aviation fuel (SAF) production and its effects on the aviation sector, the current research study is highly significant. Through the integration of perspectives from many feedstock alternatives, manufacturing techniques, financial viability, and ecological consequences of SAF, the research advances a comprehensive comprehension of the possible integration of biofuels in aviation. In contrast to conventional aviation fuel, the study explores the hydrocarbon composition, thermodynamic characteristics, and combustion impacts of several SAF types, including camelina, jatropha, and microalgae-derived fuels. In addition, the study might examine how stakeholders feel about biofuels, evaluate the socioeconomic effects of aviation biofuel production, analyze greenhouse gas emissions from the fuel's life cycle, and look at the viability and economics of various biofuel supply chains.

The research provides valuable insights to advance the use of bio-aviation fuels and promote a more sustainable future for the aviation industry by addressing key challenges in the shift towards sustainable aviation practices, such as technological advancements, policy implications, economic considerations, and environmental sustainability. The study stands out as a significant contribution to the literature because of its thorough methodology and in-depth examination of numerous aspects connected to SAF manufacturing and adoption. By filling in knowledge gaps and laying the groundwork for future study in the area, it presents a comprehensive picture of the challenges and opportunities present in the field of sustainable aviation fuel. The investigation of stakeholder perceptions, economic viability, and environmental implications by the research adds richness to the corpus of literature already available on aviation biofuels.

The study adds to the continuing conversation on sustainable energy sources in the aviation industry by illuminating the difficulties and possible solutions in making the switch to sustainable aviation practices. All things considered, the research study makes a substantial contribution to the literature by providing information that can guide industrial practices, technological developments, and regulatory choices regarding the use of bio-aviation fuels. Table 1 presents the summaries of some important articles related to aviation fuel.

Table 1. Summary of Articles Related to Sustainable Aviation Fuel

Author	Contribution to the Sustainable Aviation Fuel Literature
Chiaromonti (2019)	Underlined the challenges and prospects for sustainable fuel adoption.
Kivits et al. (2010)	Studied the significance of airports in aiding cleaner aviation
Wang et al. (2019)	Examined the production impacts of airline fuels in a Brazilian economic system and found favourable socioeconomic outcomes for employment and Gross domestic product on balance.
O'Connell et al. (2019)	Prioritized energy efficiency and reduced greenhouse gas (GHG) emissions as the two important factors and found that some sustainable aviation fuel conversion methods are more energy intensive than others, excluding those that utilize trash and leftovers as feedstock.
Staples et al. (2018)	Examined emission reductions resulting from the manufacture of SAF using non-food feedstocks via several conversion methods across their whole life cycle. It revealed that annual investments of 12B USD will be required to reduce emissions by at least 50% by 2050.
Ganguly et al. (2018)	Performed a Life Cycle Assessment on a wood-related feedstock for SAF manufacturing. It was discovered that this type of SAF can reduce global warming by 78% as compared to traditional aviation fuel.
Seber et al. (2014)	Utilized LCA to determine the GHG discharge reductions and manufacturing expenses related to HEFA. It was discovered that LCA of green fuel derived from yellow grease created fewer GHG emissions than sustainable aviation fuel derived from tallow when compared with aviation fuel derived from petroleum.
Bann et al. (2017)	Used a financial technique to determine the most suited SAF production process from an economic standpoint. They employed a stochastic model focused on a net current value computation for six alternative approaches to defining the minimal selling price of sustainable aviation fuels.
Trivedi et al. (2015)	Found that the gasification or FT production method is more financially feasible when compared to the hybrid method by focusing on energy investment return analysis intended for Fischer Tropsch, Hydro processed ester, and fatty acids, & improved fermentation procedures utilizing various feedstock.
Neuling & Kaltschmitt (2018)	Found that the FT procedure with switchgrass yielded the highest energy ROI at 9.8% through a techno-economic assessment, including environmental factors for SAF production paths, concluding that such operations use the mass and

	energy balance method. Achieving technological, economic, and environmental objectives concurrently for a single method is not possible.
Li et al. (2018)	Discover that the production parameters analysed, the MSP of sustainable aviation fuel ranged from \$0.40 to \$0.17 per Liter, with feedstock expenditure being the most sensitive factor.
Michailos (2018)	Conducted a thorough production design and cost evaluation of sustainable aviation fuel from sugar cane residual (bagasse). It was discovered that one kilogram of dry bagasse may create 0.121 kilograms of sustainable aviation fuel at a rate of \$2.78 per Liter
Lokesh et al. (2015)	Explored the effects of sustainable aviation fuel hydrocarbon composition, thermodynamic characteristics, & fuel combust on airplane performances studied three alternative SAFs and compared them to standard aviation fuel, including camelina, jatropha, as well as microalgae.
Hileman & Stratton (2014)	Focused on many criteria to evaluate the viability of various sources of fuels for the airline industry and showed that the fuels obtained from the Fischer Tropsh & HEFA procedures were shown to be practical for supplementing the existing aviation fuel supplies. However, hydrogen is deemed impracticable because of airplanes' existing engine technology.

## 2.1. Sustainable aviation fuel production pathways

### 2.1.1. Aviation Industry at Present

The aviation industry plays a significant role in contributing to global warming, accounting for approximately 3.5% of global warming when considering non-CO<sub>2</sub> emissions and around 2.5% of global CO<sub>2</sub> emissions in 2018 (Ritchie, 2020). Despite its environmental impact, aviation is perceived as a challenging sector to decarbonize both technologically and economically. In 2019, emissions from jet fuel combustion reached 1027 Metric tons of CO<sub>2</sub>, constituting 12% of the CO<sub>2</sub> emissions from the overall transportation industry (Atag.org, 2022; IEA, 2022).

“The UN Climate Change Conference” set a target to limit the average global temperature rise to below 2°C above pre-industrial levels, with an aspiration for 1.5°C (United Nations., 2015). Governments worldwide have been making efforts to develop strategies to achieve these goals, but many existing initiatives have fallen short. The transportation sector, including aviation, lags behind other industries in its decarbonization efforts, and the European Union has pointed out that it is not on track to meet its climate goals. Criticism has been directed at the aviation sector's short-term carbon reduction plans as insufficient in the face of the current climate crisis (Reuters., 2021).

ICAO (International Civil Aviation Organization) member nations endorsed the Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) in 2016, a market-based framework aimed at achieving net-zero growth in global aviation emissions from 2020 onwards. However, most of these plans and initiatives were based on assumptions of significant corporate air traffic growth and did not account for the sudden disruption caused by the COVID-19 pandemic, resulting in a historic decline in global aviation passengers (International Civil Aviation Organization, 2021). While aviation traffic has partially rebounded in 2021, it remains lower than pre-pandemic levels.

The pandemic's impact on aviation is considered temporary, and long-term projections suggest that passenger traffic in 2050 may still be 8% lower than pre-pandemic estimates. Despite this, the need for mitigation strategies remains, and some existing carbon reduction strategies have had to adapt to the changing circumstances (International Civil Aviation Organization., 2022). Various strategies can reduce the aviation sector's greenhouse gas (GHG) emissions, but their effectiveness varies. Optimizing flight routes for minimal emissions, improving maintenance schedules and other operational initiatives, and developing new weight management resources and related technologies are all important contributors to emissions reduction. However, these efforts alone are insufficient given the growing aviation traffic and emissions (Timperley, 2021).

While the current generation of aircraft is more energy-efficient than previous generations, the rate of improvement is slowing, and it is unlikely to keep up with the expected growth in aviation traffic (International

Civil Aviation Organization., 2019). Additionally, emissions during the takeoff and climb phases, as well as ignition and warm-up emissions, are significant. Some argue for halting aviation industry expansion, but this is impractical given industry competition. To achieve meaningful emissions reductions, commercial aviation must reduce its reliance on fossil fuels (Alkema, B., 2022; Fortier et al., 2014).

Hydrogen-powered and battery-powered aircraft are potential alternatives for the future, but they require substantial changes to aircraft design and face delays in new deliveries and high short-term costs (Scheelhaase et al., 2019). For short and medium-range flights, “drop-in” SAF offer a viable alternative to traditional jet kerosene. Various pathways to produce SAF have been licensed for commercial use, with bioactive feedstocks being the most common. However, sustainability remains a challenge for larger-scale operations, and power-to-liquid options may be a more suitable solution, albeit at higher costs (aviationbenefits.org, 2022).

#### 2.1.2. Green Fuels Used in the Aviation Industry

SAF refer to drop-in kerosene alternatives made from various feedstocks. The ICAO defines SAF as alternative fuels that meet specific sustainability criteria (ICAO, 2022). Although SAF research initially focused on economic and supply concerns, it has gained momentum due to environmental factors. By 2019, over 45 airlines had flown more than a quarter million SAF flights, albeit representing less than 0.1% of total jet fuel usage (IEA, 2022). One challenge for SAF adoption is the existing restrictions on blending ratios. SAF can significantly reduce CO<sub>2</sub> emissions and other pollutants, but blending ratios are typically limited to 5-50%, depending on the production process. Early SAF formulations did not meet the aromatic component requirements, but recent advancements in SAF transfer techniques and O-ring technology may lead to regulatory changes. United Airlines successfully operated an aircraft with 100% SAF in 2021 (Palmer, 2021).

#### 2.1.3. Certification Procedure for Sustainable Aviation Fuels

SAF must meet the same characteristics as conventional jet fuel, ensuring that it is “drop-in ready.” The global standard for classifying kerosene fuel in commercial aviation is the American Society for Testing and Materials (ASTM) D1655, which applies to both Jet A and A-1 fuels. Jet A-1 is preferred for long-distance flights using arctic routes due to its low freezing point, but it comes at a higher production cost (Chevron Products Company, 2004). ASTM D45054 established a three-stage, four-tiered testing method, which is a mandatory procedure for qualifying and certification of new airline turbine fuels and extracts, which is required for a novel aircraft fuel to be licensed for business use.

In summary, the aviation industry faces significant challenges in reducing its greenhouse gas emissions, and various strategies are being explored. SAF represent a promising option, but there are obstacles to their widespread adoption, including blending restrictions. Certification processes like ASTM D4054 are essential to ensure the quality and safety of SAF for aviation use.

#### 2.1.4. Biofuels Utilized in the Aviation Sector

SAF must meet stringent criteria and undergo certification processes before they can be used in commercial aviation. ASTM D4054 outlines a comprehensive testing procedure that requires various fuel quantities at each level. This process, lasting 3 to 5 years, imposes a minimum cost of \$5 million on prospective fuel manufacturers (Heyne et al., 2021).

To accelerate research and development, ASTM introduced a fast-track annex for D4054 in January 2020, although SAFs certified through this method are limited to a blending ratio of 10% (US Dept. Of Energy, 2020).

#### 2.1.5. Renewable Feedstocks for Biofuels

Biofuels can be produced from renewable feedstocks, which are carbon-based materials capable of renewal. The production of biofuels from plants involves processes that reduce carbon life-cycle emissions, as some of the CO<sub>2</sub> released during production is absorbed by the next crop generation. A comparison of carbon life-cycle emissions between fossil-based aviation fuel and bio SAF is shown in Figure 1. Some frequent feedstocks used for biofuels are listed below.



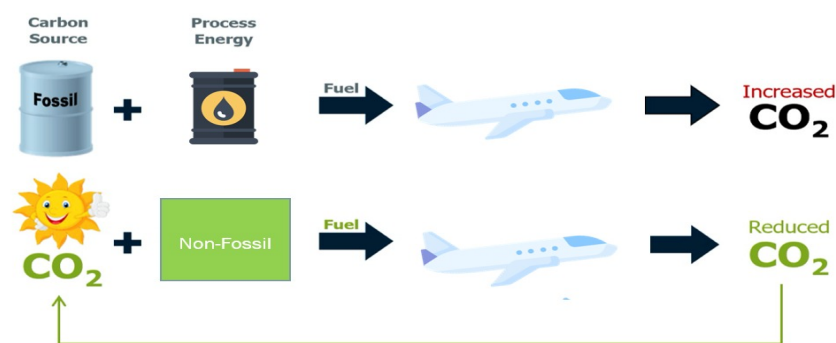


Figure 1. LCA of carbon for fossil aviation fuels (a) and sustainable biofuels (b) (VDOCUMENT, 2017)

**Camelina:** *Camelina sativa* is a non-edible fuel crop with a high fatty oil content, making it a valuable raw material for biofuel production. The byproduct of oil extraction can also be used as supplemental feed for livestock. Camelina is employed as a cover crop, contributing to soil quality improvement and reducing erosion (World Economic Forum., 2020).

**Jatropha:** *Jatropha Curcas* is another potential source of lipid oil for biofuel production. It can thrive in marginal or unproductive environments, making it a promising candidate for biofuel production. However, challenges such as low seed production, vulnerability to diseases, and extraction complexity need to be addressed (Moniruzzaman et al., 2017).

**Halophyte:** Halophytes are salt-tolerant plants that show potential as feedstocks for biofuels, both oil and lignocellulosic. They can grow in harsh environments and have adaptability for use in fuel production. Their growth may also contribute to desalinizing arable land (CAAFI, 2019).

**Algae:** Algae, often referred to as “algae fuels,” are considered third-generation biofuels. They have rapid growth rates, require less land, and excel in carbon sequestration. Algae can be farmed in marginal sites and offer significant potential for biofuel production (Chisti, 2007).

**Waste Oil:** Various waste materials can be converted into SAFs, including residual cooking oil, livestock fats, tall and fish oils, and other leftover lipids. Forest and agricultural residues, as well as municipal solid waste, also have potential as eco-friendly fuel sources (O’Malley, J., Pavlenko, N., and Searle, 2021).

#### 2.1.6. Accredited Paths for Biofuel Production

ASTM has validated eight technological systems or conversion methods for producing SAFs, which are outlined in annexes to standards like D7566. Fischer-Tropsch (FT) synthesis is one such method, with two variants: FT-SPK and FT-SPK/A. FT-SPK has a maximum allowable mix percentage of 50%. It involves a reactor using a cobalt/iron compound to catalyze a thermochemical reaction, resulting in synthetic paraffinic kerosene (SPK) that is functionally equivalent to conventional aviation fuel. FT-SPK/A includes benzene to increase the aromatic content of the final hydrocarbon, improving compatibility with modern engines (CAAFI, n.d.; SkyNRG., 2020).

#### 2.1.7. Challenges Faced in Biofuel Adoption

Several challenges hinder the development and widespread use of alternative fuels, including:

- **Insufficient Maturity of Fuel Approaches:** Many alternative fuel approaches are not fully mature, limiting their practicality.
- **Lack of Raw Material:** Adequate quantities of raw materials for fuel production, particularly for biofuels, can be scarce.
- **Sustainability Concerns:** The sustainability of feedstock generation, especially for biofuels, raises environmental and ethical concerns.
- **Lack of International Support:** The absence of support from international bodies and governments for transitioning from fossil fuels to alternative fuels hampers progress.

These challenges impact the cost-efficiency of SAFs and may hinder the aviation industry's efforts to reduce emissions and achieve sustainability goals. While SAFs have made progress in recent years, achieving ultimate technical ease on demand remains a challenge (Ricardo Energy and Environment., 2020). In conclusion, biofuels hold promise as a sustainable alternative to traditional aviation fuels, with various feedstocks and production methods under consideration. However, significant challenges, such as feedstock availability and sustainability concerns, must be addressed to ensure the successful adoption of these fuels in the aviation industry.

## 2.2. Approaches to Producing Sustainable Aviation Fuels (SAFs)

SAF can be produced through various methods, each with its unique technological, economic, societal, and environmental characteristics. These methods can be broadly categorized into biochemical and thermochemical routes, as depicted in Figure 2.

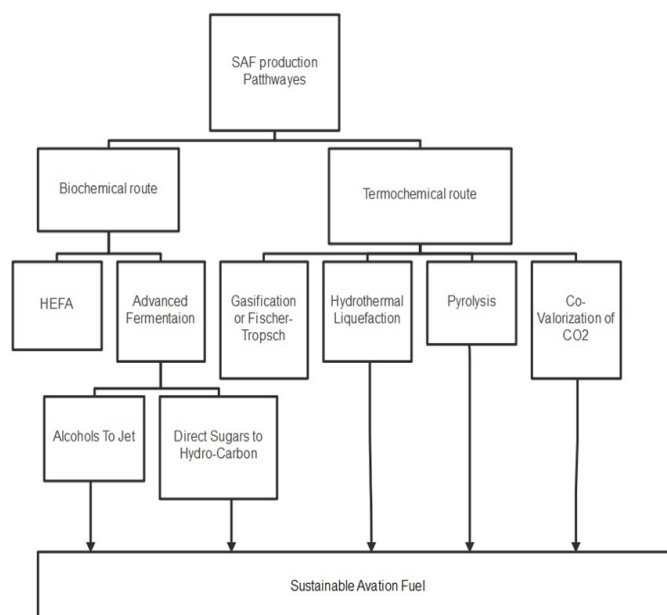


Figure 2 Process classification on SAF production paths (Shahabuddin et al., 2020)

HEFA is a process that produces long-chain hydrocarbons through hydrogenation and isomerization of oils, including animal fat, vegetable oil, residual grease, and algae oil. The resulting SAFs have high energy content, good thermal stability, and lower tailpipe emissions. ASTM has approved HEFA fuels for use in blends with regular aviation fuel, with a maximum blending limit of 50%. Several airlines, such as KLM, Lufthansa, and Etihad, have conducted successful test flights using HEFA-based mixtures (Dayton & Foust, 2020).

Advanced fermentation includes two processes. Alcohols To Jet (ATJ): This process produces long-chain hydrocarbons similar to traditional Jet-A1 fuel from alcohols like ethanol, methanol, or n-butanol. The alcohol can be generated from sugar fermentation, catalytic transformation of biomasses, or direct carbohydrate conversion into hydrocarbons. The ATJ process consists of four steps: dehydration, oligomerization, hydrogenation, and distillation. It has reached an advanced stage of development but involves higher infrastructure costs compared to FT (Geleynse et al., 2020).

Direct Sugars to Hydro-Carbon (DSHC) does not require alcohol generation. Concentrated carbohydrates are converted into hydrocarbons using anaerobic fermentation. The process includes phase separation to produce aviation fuel (Zhang, Wang, et al., 2020). The FT production involves the conversion of syngas (carbon monoxide and hydrogen) from carbon-rich biomass into liquid fuel through a catalytic process. Various biomass resources, such as wood wastes, poplar, willow, and agricultural wastes like corn stover and wheat straws, can be used to create carbon-free aviation fuel. The FT process requires high temperatures and pressures, making it a costly method (Dayton & Foust, 2020).

Pyrolysis produces gas, charcoal, and bio-oil as its primary products. Bio-oil contains a wide range of organic molecules but has a high oxygen concentration. To make it suitable for use as aviation fuel, oxygen molecules must be removed through hydrotreating in the presence of high-pressure hydrogen. After purification, a variety of hydrocarbons, including aviation fuels, can be obtained (Chen et al., 2020).

HTL (Hydrothermal Liquefaction) employs high temperatures and pressurized water to convert biomass into liquid fuel sources. Feedstocks for HTL include algae, composts, wastewater sludge, and lignocellulosic materials like corn stover. The resulting bio-crude has a high oxygen concentration, which is eliminated during hydrotreating. Distillation is then used to separate the refined hydrocarbons into aviation fuel, diesel, and other byproducts (Castello et al., 2019).

Co-Valorization of Carbon Dioxide and Waste Biomass approach, waste biomass is gasified to produce syngas rich in carbon monoxide (CO), while syngas rich in hydrogen (H<sub>2</sub>) are generated through the co-electrolysis of CO<sub>2</sub> and water. These gases serve as dual feedstocks for FT processes (Zhang, Fang, et al., 2020).

### 2.3. Policy and Support for SAFs

To encourage the transition from fossil fuels to renewable energy sources, policies and financial assistance systems play a crucial role. Examples include newly authorized tax breaks in the United States and direct project finance. Legislation, like the European Commission's Refuel EU Aviation directive, sets individual objectives for sustainable aviation fuel integration in European Union airports. Such policies set targets for the incorporation of biofuels and e-fuels in aviation fuel mixes, providing a regulatory framework for SAF adoption (Dyk, 2021).

In conclusion, various methods are employed to produce sustainable aviation fuels, each with its advantages and challenges. These approaches are essential for reducing greenhouse gas emissions and promoting the use of renewable energy sources in the aviation industry.

### 3. Research methodology

In this research, the methodology used to evaluate the effectiveness of SAF production methods is presented. The approach involves an MCDM framework designed to be adaptable and flexible to meet the needs of various stakeholders in the airline sector. The initial stage comprises a PROMETHEE-based criteria selection stage, while the next step evaluates the alternatives (see Figure 3).

The initial phase involved identifying performance standards and measurements for SAF production techniques. Fifteen different production paths for SAF were found in the literature review. Additionally, a list of 45 performance indicators related to social, economic, environmental, and technological aspects of sustainable transport fuels was compiled. To refine the criteria, a value tree approach integrated into the Delphi technique was employed. Experts and stakeholders participated in an online survey, and a consensus level was established. The final model included 24 criteria and 11 SAF production paths, which were evaluated based on various parameters. Criterion and codes for final evaluation are illustrated in Table 2 and sustainable aviation fuel production paths evaluated in this research are given in Table 3. The references that used the same or similar evaluation criteria are listed in the Appendix (see Table A2).

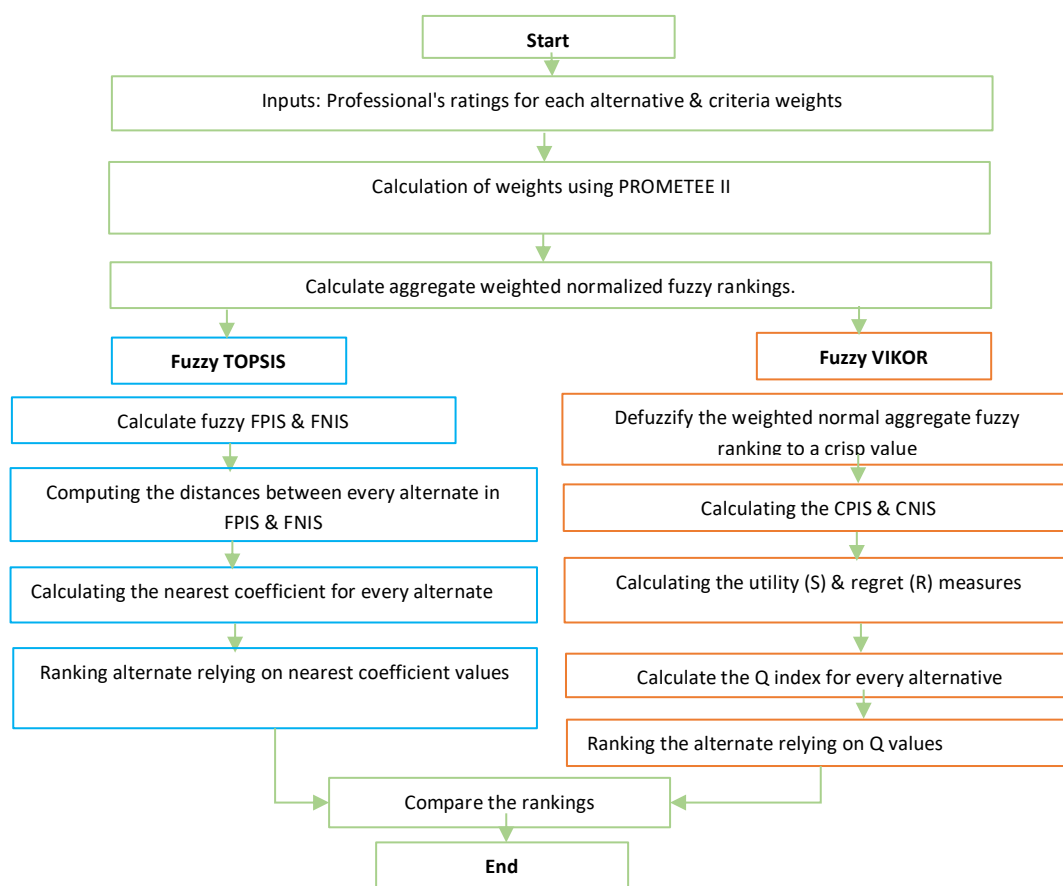


Figure 3. The flowchart on the fuzzy multicriteria decision method

Table 2. Final Evaluation of Criterion and Codes

Category	Code	Criterion	Description
Social	Soc1	Traceability	Transparency of the whole manufacturing procedure from the raw materials to the finished products (Lanzini et al., 2016).
	Soc2	Economical contribution	This signifies the establishment of new businesses, industrial areas, rural growth, etc. (Wang et al., 2019).
	Soc3	Food safety	The effect of feedstock utilized to produce green fuel on food availability (Sikarwar et al., 2017).
	Soc4	Social acceptance	Public opinion towards SAF production and utilization (Gegg & Wells, 2017).
Environmental	Env1	Sustainability on feedstock	It signifies the continued availability of feedstock for green fuel production (Chiaromonti, 2019).
	Env2	Savings on GHG emissions	CO <sub>2</sub> discharge levels compared to jet fuels (Zemanek et al., 2020).
	Env3	The impact caused by a change in land usage	SAF production changes land use directly and indirectly (Lanzini et al., 2016).

	Envt4	Water and Soil pollution	Impact of using fertilizers and pesticides to produce biomass (Efroymson et al., 2017).
Economic	Econ1	Alternative uses with feedstock	Other potential feedstock applications besides SAF production like electricity and biomethane (Hileman & Stratton, 2014).
	Econ2	Profitability of feedstock	Monetary benefits in generating a particular feedstock (Klein et al., 2018).
	Econ3	Minimal price for selling	Minimum selling price estimated for the SAF (Ribeiro et al., 2017).
	Econ4	Input energy usage	Energy consumption during SAF manufacture (Baudry et al., 2018).
	Econ5	Productivity of Land	Incorporation of short crop rotations or intensive farming methods (Li et al., 2018).
	Econ6	Operational and maintenance costs	Operational and maintenance costs related to the SAF production plant (Diederichs et al., 2016).
	Econ7	Cost on feedstock	Costs of acquiring raw materials required for manufacturing of fuel (de Jong et al., 2015).
	Econ8	Cost of plant capital	Construction-related costs of production and associated services (Moore et al., 2017).
Technical	Tech1	Blending limits	Amount of authorized alternative fuel that can be blended with standard jet fuels (Cheng & Brewer, 2017).
	Tech2	Compatibility with Standard jet fuels	Fuel characteristics, such as flashpoint, viscosity, density, and energy content, closely resemble those of conventional jet fuel (Hileman & Stratton, 2014).
	Tech3	Local technical capability	The availability of locally accessible production technologies (Neuling & Kaltschmitt, 2018).
	Tech4	Integration process	The capability of a production method to be integrated with established jet-fuel refinery infrastructures (Ahmad et al., 2017).
	Tech5	Maturity of process technology	The current stage of development for a workflow is either initial, demo, or commercialized (Bann et al., 2017).
	Tech6	Method yield	Quantity of sustainable aviation fuel acquired via conversion method (Schillo et al., 2017).
	Tech7	Scalability on production volume	Capability for future expansion of sustainable aviation fuel processing facilities (Atsonios et al., 2015).
	Tech8	Composition and quality of feedstock	Quality of SAF batch (Fiorese et al., 2013).

Table 3. Sustainable Aviation Fuel Production Paths Evaluated in this Research

Production method	Feedstocks	Code
	Algae and microalgae	A 1

Hydro processed Esters and Fatty Acids (HEFA)	Used cooking oils and animal fats	A 2
	Oilseeds	A 3
Fischer-Tropsch synthesis or gasification	Municipal solid wastes	A 4
	Wood residues and agricultural wastes	A 5
Devolatilization or Pyrolysis	Algae and microalgae	A 6
	Wood residues and agricultural wastes	A 7
Hydrothermal liquefaction (HTL)	Algae and microalgae	A 8
	Wood residues and agricultural wastes	A 9
Advanced fermentation	Wood residues and agricultural wastes	A 10
CO <sub>2</sub> co-valorization and biomass waste	Combination of industrial waste gases CO <sub>2</sub> and wood residues	A 11

To understand the relative importance of criteria, interviews were conducted with 22 European aviation fuel supply chain experts. The summary of the expert pool is given in Table A1. These experts, each with more than five years of experience, ranked four significant criteria (social, environmental, economic, and technological) concerning one another. This ranking system provided a total score out of 100 for each criterion.

Airline industry professionals were surveyed to rate SAF production paths based on different criteria. Due to the limited availability of data, a numerical scale was introduced, ranging from 1 to 9, with corresponding descriptions like extremely poor, poor, average, good, and excellent. These values were then converted to a score out of 100. The PROMETHEE-II approach (Brans & Vincke, 1985), known for handling both qualitative and quantitative data, was chosen for the analysis. This approach helps address conflicting objectives and trade-offs, making it suitable for decision problems involving multiple criteria. PROMETHEE-II approach is especially useful when there are conflicting objectives and trade-offs to consider, making it applicable to a wide range of decision problems. It can help decision-makers better understand the relationships between criteria and alternatives. This means that subjective judgments and expert opinions can be integrated into the model.

PROMETHEE-II can be conceptualized as a modeling and key paradigm for MCDA difficulties in which the difficulty in deciding is modeled as a fully connected system where nodes are alternative and the arc reflects preferences relations among node pairs or alternatives  $(a, b)$ , like  $\pi(a, b)$ .

The alternative or node's strength  $a$ , which is called the net outranking flow, is written as  $\phi(a)$  or  $\phi_{net}(a)$ , and it is calculated by deducting outward outranking flow  $\phi^+(a)$  from inward outranking flow  $\phi^-(a)$  i.e.,  $\phi_{net}(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$ . The answer to the question of rating a group of alternatives according to the MCDM approach is provided by arranging alternatives as per their strength in descending order as calculated through net outranking flows,  $\phi_s$ . Following is a breakdown of the method in detail.

**Input:** Weighting scheme and the decision matrix

In PROMETHEE II, the data is integrated into a decision matrix as depicted in Eq. 1 below.

$$DM = [c_1(a_1) \cdots c_n(a_1) \quad \ddots \quad c_1(a_m) \cdots c_n(a_m)] \quad (1)$$

Where the alternative set is denoted as  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ , and the performance criteria set is considered as  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_n\}$ . The alternative  $a_i$ 's performance on criterion  $j$  is indicated by  $c_j(a_i)$  where;  $i = 1, \dots, m$ , and  $j = 1, \dots, n$ . After that, we obtain the comparative importance weight ( $w_j$ ), of  $n^{\text{th}}$  performance criterion.  $w_j = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , where  $j = 1, \dots, n$ , it includes non-negative weights with  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ .

**Step 1:** For every alternative pair  $(a, b)$  on criteria  $j$ , we calculate the difference of opinion in criterion  $j$  performance concerning alternative  $a$  and  $b$ , represented as  $D_j(a, b)$ , (Eq. 2):

$$D_j(a, b) = c_j(a) - c_j(b), j = 1, \dots, n \forall a, b \in A \quad (2)$$

**Step 2:** To find every alternative pair  $(a, b)$  for criterion  $j$ , the method calculates a local preference index  $P_j(a, b)$ , that considers the difference of opinion in the performance of criterion  $j$  concerning alternative  $a$  and  $b$  that is calculated previously using step 1. Brans and Vince (1985) highlighted the different preference index functions. This study adopts the type 1 general preference as given in Eq. 3.

$$P(D) = \{0, \text{ if } D \leq 0 \text{ \& } 1, \text{ if } D > 0\} \quad (3)$$

**Output:** The concluding rating of each of the alternatives is determined based on the net ranking,  $\Phi_{net}(\cdot)$ . That is, the higher the net ranking, the more desirable the alternative is. The study by Shahmardan & Hendijani Zadeh, (2013) provides more insight into the application of the net ratio ( $\Phi_{net}(\cdot)$ ) in the framework of multi-criteria decision-making (MCDM). Insights into the use of fuzzy sets and fuzzy entropy in decision-making processes are provided by combining fuzzy logic and PROMETHEE techniques. This improves knowledge of how the net ratio can be successfully included in MCDM analyses.

To compare the results of the ranking, this study utilized two alternative MCDM methodologies: TOPSIS and VIKOR. To account for the unpredictability of professional preferences, the research adopts the fuzzy version of the TOPSIS and VIKOR approaches (Awasthi et al., 2018). A summary of detailed implementation information for the formulations of fuzzy TOPSIS and VIKOR analysis is discussed here.

**Inputs:** The ranking done by the  $K$  professionals of  $m$  alternatives with  $n$  criteria is denoted with  $x_{ij}^k$ ; where  $i = 1, \dots, m$ , and  $j = 1, \dots, n$ , and  $k = 1, \dots, K$  and every professional's given weight for every criterion is  $w_j^k$ ; where  $j = 1, \dots, n$ , and  $k = 1, \dots, K$ .

**Step 1:** Choosing a proper modelling context and computing the aggregated fuzzy rankings for every alternative and weights on every criterion. Utilizing fuzzy triangular numbers to develop the fuzzy data is easier and more common, whereas this study relates to the rankings. Hence, for every alternative "i" ( $i = 1, \dots, m$ ) and criteria "j" ( $j = 1, \dots, n$ ), the rankings by  $K$  professionals are combined to singular triangle fuzzy rankings, assume  $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ , like:

$$a_{ij} = \min_k \{x_{ij}^k\}; b_{ij} = \frac{1}{K} \sum_k x_{ij}^k; c_{ij} = \max_k \{x_{ij}^k\} \quad (4)$$

Likewise, compute the aggregated fuzzy weights for all criteria  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ), assume  $\tilde{w}_{j,1} = w_{j,1}, w_{j,2}, w_{j,3}$ , like:

$$w_{i,1} = \min_k \{w_j^k\}; w_{j,2} = \frac{1}{K} \sum_k w_j^k; w_{j,3} = \max_k \{w_j^k\} \quad (5)$$

Summarize aggregate fuzzy rankings as a decision matrix and fuzzy weight as a vector criterion.

**Step 2:** Computing weighted normal aggregate fuzzy rankings, assume  $\tilde{n}_{ij}$  where  $i = 1, \dots, m$  and  $j = 1, \dots, n$ , like:

$$\tilde{n}_{ij} = \tilde{w}_j \otimes \left( \frac{a_{ij}}{\max_i}, \frac{b_{ij}}{\max_i}, \frac{c_{ij}}{\max_i} \right) = \left( w_{i,1} \frac{a_{ij}}{\max_i}, w_{i,2} \frac{b_{ij}}{\max_i}, w_{i,3} \frac{c_{ij}}{\max_i} \right); \text{ where, } i = 1, \dots, m \text{ and } j \in C^+ \quad (6)$$

$$\tilde{n}_{ij} = \tilde{w}_j \otimes \left( \frac{\min_i}{a_{ij}}, \frac{\min_i}{b_{ij}}, \frac{\min_i}{c_{ij}} \right) = \left( w_{i,1} \frac{\min_i}{a_{ij}}, w_{i,2} \frac{\min_i}{b_{ij}}, w_{i,3} \frac{\min_i}{c_{ij}} \right); \text{ where, } i = 1, \dots, m \text{ and } j \in C^- \quad (7)$$

where  $C^-$  (respective  $C^+$ ) indicates the cost criterion set (respective benefit criterion) in which low values (respective high values) are better. Based on the values obtained at this step, fuzzy TOPSIS follows the steps below.

**Step 3:** Computing the Fuzzy positive and Negative ideal solutions (FPIS and FNIS) accordingly assuming  $\tilde{n}^+$  and  $\tilde{n}^-$ , like:

$$\tilde{n}_j^+ = \{ \min_{i=1, \dots, m} \tilde{n}_{ij} \text{ IF } j \in C^- \max_{i=1, \dots, m} \tilde{n}_{ij} \text{ IF } j \in C^+ ; j = 1, \dots, n \quad (8)$$

$$\tilde{n}_j^- = \{ \max_{i=1, \dots, m} \tilde{n}_{ij} \text{ IF } j \in C^- \text{ mix}_{i=1, \dots, m} \tilde{n}_{ij} \text{ IF } j \in C^+ ; j = 1, \dots, n \} \quad (9)$$

**Step 4:** Computing the distances i.e.,  $d(i, \tilde{n}^+)$  and  $d(i, \tilde{n}^-)$  between every alternate  $i$  in FPIS ( $\tilde{n}^+$ ) and FNIS ( $\tilde{n}^-$ ), where  $i = 1, \dots, m$ :

$$d_i^+ = \left\{ \frac{1}{n} \sum_j^n (\tilde{n}_{ij} - \tilde{n}_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$d_i^- = \left\{ \frac{1}{n} \sum_j^n (\tilde{n}_{ij} - \tilde{n}_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

**Step 5:** Choosing similar scores, which is also known to be the closest coefficient for every alternate  $i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) as shown below:

$$S_i^- = d(i, \tilde{n}^-) / (d(i, \tilde{n}^-) + d(i, \tilde{n}^+)) \quad (12)$$

**Step 6:** Ranking the alternate in ascending order concerning their similarities in the ranks. Hence, the effective alternate method is distanced from FNIS and nearest to the FPIS.

Alternatively, fuzzy VIKOR determines the optimal ranking based on the following procedure, where Steps-3-6 are redefined as follows.

**Step 3:** Defuzzification of the weighted normal aggregate fuzzy rankings, i.e.,  $\tilde{n}_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ ) as crisp value by considering  $n_{ij}$ , as shown below:

$$n_{ij} = \frac{1}{6} \left( w_{j,1} \frac{a_{ij}}{\max}, 4w_{j,2} \frac{b_{ij}}{\max}, w_{j,3} \frac{c_{ij}}{\max} \right); \text{ where, } i = 1, \dots, m; \text{ and } j \in C^+ \quad (13)$$

$$n_{ij} = \frac{1}{6} \left( w_{j,1} \frac{\min}{a_{ij}}, w_{j,2} \frac{\min}{b_{ij}}, w_{j,3} \frac{\min}{c_{ij}} \right); \text{ where, } i = 1, \dots, m \text{ and } j \in C^- \quad (14)$$

**Step 4:** Computing the crisp positive ideal solution (CPIS) considering  $n^+$  Moreover, calculating the rating as shown below:

$$n_j^+ = \{ \min_{i=1, \dots, m} n_{ij} \text{ IF } j \in C^- \text{ max}_{i=1, \dots, m} n_{ij} \text{ IF } j \in C^+ ; \text{ where, } j = 1, \dots, n \} \quad (15)$$

**Step 5:** Calculate the performance marks i.e.,  $Q_i$  for every alternate  $i$ , where; ( $i = 1, \dots, m$ ):  $Q_i = \alpha \left( \frac{S_i - S^+}{S^- - S^+} \right) + (1 - \alpha) \left( \frac{R_i - R^+}{R^- - R^+} \right); 0 \leq \alpha \leq 1$

where,

$$S_i = \sum_{j=1}^m (n_j^+ - n_{ij}); R_i = \max_j \{ (n_j^+ - n_{ij}) \} \quad (16)$$

$$S^+ = \min_i S_i; S^- = \max_i S_i; R^+ = \min_i R_i; R^- = \max_i R_i \quad (17)$$

Consider  $\alpha = 0.5$

**Step 6:** Ranking the alternate methods according to their performance in descending order. Hence, the superior alternate method holds the lowest value.

#### 4. Research findings and analysis

This section discusses the weights assigned to criteria, ranks based on broader implications, and PROMETHEE-II ratings. After gathering expert opinions, geometric means are used to derive criteria weights. Economic and environmental criteria carry the most weight, at 31% and 28%, respectively. Technological criteria account for 25%, while social criteria are the least significant at 16%. Local weights highlight the importance of specific criteria within each category. For example, food security and social acceptance are crucial in societal impact, with weights of 29.8% and 26.9%, respectively. Among environmental concerns, reducing greenhouse gas emissions is a top priority at 36.6% (see Figure 4).



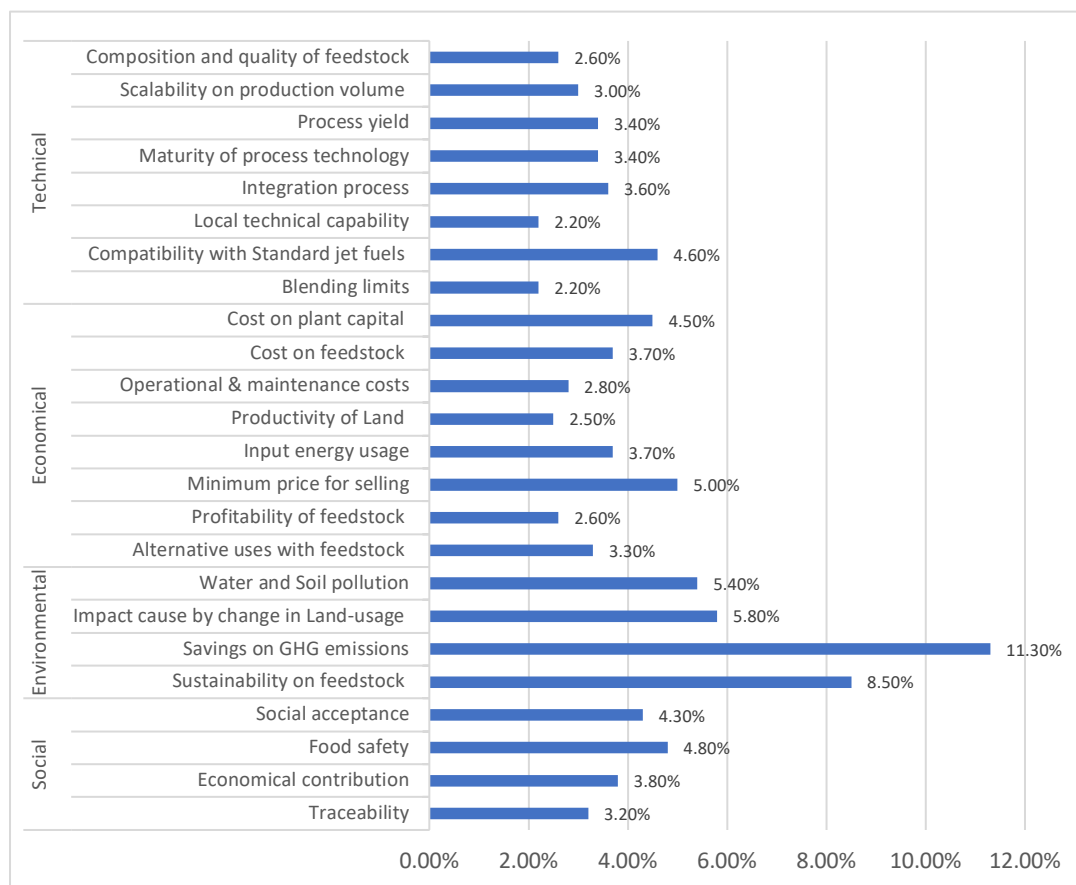


Figure 4. Global weight of selected criteria Source

Principal Components Analysis (PCA) yielded a 2D GAIA plot (see Figure 5), showing relationships and conflicts between criteria. This plot helped identify criteria with competing values, such as the profitability of feedstock conflicting with minimum selling price and capital costs. Utilizing the GAIA model, disagreement, commonalities, and interdependencies between criteria are evaluated. As the length of a criterion vector increases, it becomes more discriminatory. In this instance, a 24-D criterion is predicted, with 67.1 percent.

This shows that the information offered by the group of professionals is reliable. Criteria indicating competing values can be seen in Figure 5. For instance, the profitability of feedstock (Econ2) and productivity of land (Econ5) are incompatible with alternate feedstock usage (Econ1), Minimum selling price (Econ3), and capital costs of the plant (Econ8). Identical preferences are indicated by vectors pointing toward the same direction.

Sustainability of feedstock (Env1) and Greenhouse gas emission saving (Env2) from environmental effect, whereas standard aviation fuel compatibility (Tech2), local technical capabilities (Tech3), and integration process (Tech4) have similar views. The most important factors to consider are food security (Soc13), the effect of land use changes (Env3), the operating costs and maintenance (Econ6), as well as the level of technological maturation in the procedure (Tech5). Tech5 is the only differentiating criterion on the decision axis along the vector line (Red).

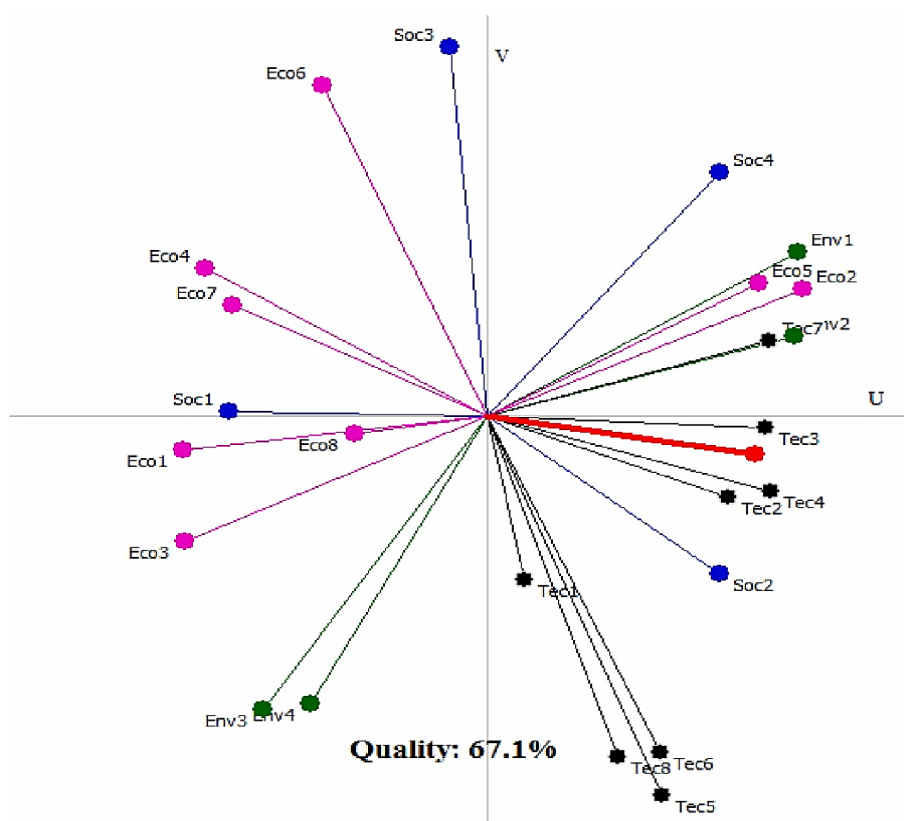


Figure 5. Graphical Representation of GAIA Plan for Selected Criteria

#### 4.1. Analysis of Sensitivity

To confirm the validity of the chosen alternates, it is crucial to evaluate the result's reliability. To do this, a sensitivity study is carried out and the initial rankings of the alternative solutions are verified. Two different strategies were used to achieve this goal:

- a. Modify the weight of the criterion, use PROMETHEE to verify the rank, and
  - b. Compare and confirm the SAF production method ranking using two additional MCDM techniques.
- a. Tests on Criteria Weights

To evaluate the impacts of varying criteria weights on alternative rankings, this research considers four scenarios:

- i. Pessimistic (considering the weights assigned to each stakeholder's least criteria)
- ii. Likely (based upon the average weights of criteria),
- iii. Optimistic (considers the highest weight of criteria obtained at the interview)
- iv. Neutral (assuming all criteria are equally weighted).

To determine the amount to which decision-makers' preferences will influence the previously stated results, this study assumes that every criterion has equal value and assigns every one of the 24 criteria a weighted sum of 4.2%. This research has been designated as neutral. In all studies reviewed, SAF method A11 obtains the highest rating in all four tests, accompanied by A4 at 2nd position 3 times and A5 at 3rd position 3 times, according to the findings of the sensitivity assessment shown in Figure 6.

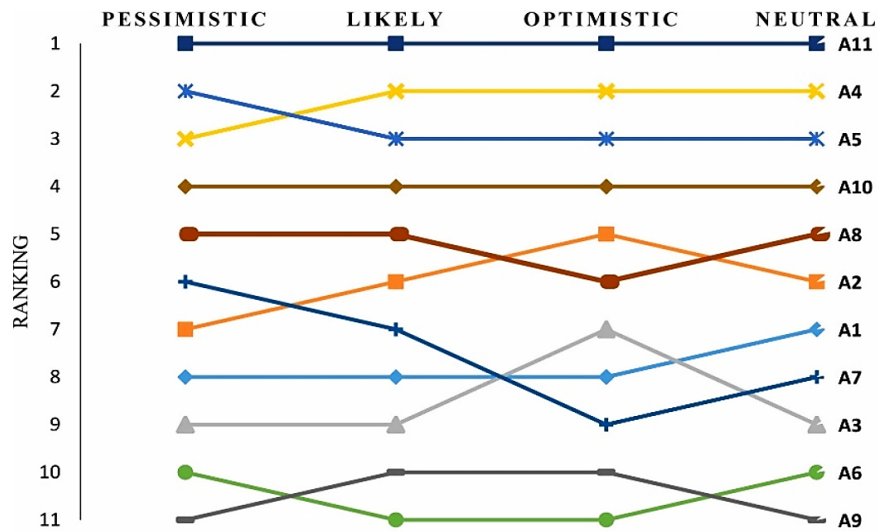


Figure 6 Sensitivity analysis results

Source: Own study

According to the research, the best and poorest-performing production method’s ranks did not significantly shift after the weights were changed to an equivalent weighting factor. This indicates that the results are reliable and resistant to changes in the weight of the input criteria. Thereby, the SAF production methods rankings can be trusted.

b. Evaluation Based on Impacting Criteria

SAF production methods have been evaluated based on stakeholders' perspectives, including social, environmental, economic, and technical impacts. Initially, utilizing weight vectors of 0.200, 0.233, 0.289, and 0.269 for social criterion, the study ranked SAF production methods as illustrated in Figure 6.



Figure 7. Graphical Representation of GAIA Plan for Selected Criteria

Gasification and Fischer Tropsch synthesis methods (A4 and A11) ranked highest from a social standpoint, as they use wood residue and municipal solid waste as feedstock, which is widely accepted. From an environmental perspective, A11 demonstrated the best performance due to its use of confined CO<sub>2</sub>, followed by A5 and A8. A6, A3, and A9 ranked poorly due to environmental drawbacks associated with algae and oilseed production.

Economically, chemical mixing procedures (A4, A5, and A11) were top-rated, while A6 and A7 were middle ranked. HEFA methods (A2 and A3) showed promise due to their lower costs compared to other alternatives. From a technical viewpoint, A5 was the best due to its high SAF yield and development status, while A1, A9, and A6 lagged.

However, regarding technological ability, A1 is the least desirable of the production routes, following A9 and A6. Because of the elevated water and oxygen concentration in the biocrude oil generated, A1 and A6 with algae or microalgae have a reduced sustainable aviation fuel yield. According to research data, A6 has a superior production method than A9. Figure 7 shows the graphical representation of the GAIA plan for selected criteria.

#### 4.2. SAF Production Methods and Global Ratings

PROMETHEE-II was used to evaluate SAF production methods based on 24 criteria. A11 consistently ranked the highest, followed by A4 and A5. These methods were favored for their cost-effective use of feedstock like wood residue and municipal solid waste. Table 4 illustrates the inflow and outflow in sustainable aviation fuel production methods while Figure 8 shows the ranking of the alternatives.

Figure 8 shows that Method A6 has the lowest outranking flow of all Sustainable aviation fuel production methods, with a value of 0.207, and A9 and A3 are the next two extremes, with values of 0.2045 and 0.111 accordingly. The A11 production method has a total outranking flow of 0.240, greater than all other methods. The fact that the highest-ranked production methods, A4, A5, and A11, are gasification or Fischer-T synthesis procedures demonstrates that professionals acknowledge that they are the most appropriate methods for Sustainable aviation fuel production. Syngas, the primary constituent of gasify or Fischer Tropsch synthesis, is produced from Municipal Solid wastes, wood residues, and Agri wastes, all of which are inexpensive feedstock. This offers gasification or Fischer-T synthesis-related production methods a strategic benefit by offsetting its higher capital costs and smaller production scale in comparison to HEFA methods (Neuling & Kaltschmitt, 2018).

Besides gasification or Fischer-T synthesis, the study indicates that A10, which is advanced fermenting, is the second-best method. In contrast to the existing research, which claims that advanced fermenting (DSHC and ATJ) related methods are constrained in feedstock sustainability and incapable of reaching the commercial development stage, the results presented here appear plausible. Nevertheless, it might be challenging to scale up the advanced fermented production process. Figure 8. illustrates that A10 ranks comparatively higher because of its superior overall technical and environmental attributes.

Although A8 (HTL methods with algae or microalgae) scored higher than A2 (HEFA using waste cooking oils or animal fat), this production method's possible capacity expansion is constrained by the availability of inputs. Eventually, other options outperform A6 and A9 (production method using pyrolysis and HTL, respectively). These outcomes are constant with relevant research on biofuel generation technologies (Fiorese et al., 2013). According to their study of industry professionals, gasification or Fischer-T synthesis and oil-based methods, including HEFA, Pyrolysis, and HTL, were the most common production methods.

The optimal feedstock for SAF production is the direct transition process of CO<sub>2</sub> to SAF (A11) in the gasification or Fischer-T synthesis group. This might be the case since experts believe that CO<sub>2</sub> extraction from industrial technologies is a more direct way than employing MSW (A4), wood residues, and agricultural waste (A5). The reduction in Greenhouse gas emissions by using landfill gas to counterbalance the use of fossil fuels has been dropped even though converting MSW into biofuel prevents Greenhouse gas emission that derives waste in landfills and incinerating processes (Staples et al., 2018).

Table 4. Inflow and outflow in sustainable aviation fuel production methods

Production method	Code	Feedstocks	Inflow	Outflow	Net Phi
Hydro processed Esters and Fatty Acids (HEFA)	A 1	Algae and Microalgae	0.442	0.518	- 0.077
	A 2	Animal fats or Used cooking oils	0.487	0.465	0.023
	A 3	Oilseeds	0.423	0.534	- 0.112
FT synthesis or gasification	A 4	Municipal solid wastes	0.583	0.386	0.198
	A 5	Wood residues and Agri wastes	0.552	0.423	0.130
Devolatilization or Pyrolysis	A 6	Algae and Microalgae	0.375	0.582	- 0.208
	A 7	Wood residues and Agri wastes	0.446	0.517	- 0.072
Hydrothermal liquefaction (HTL)	A 8	Algae and Microalgae	0.483	0.464	0.020
	A 9	Wood residues and Agri wastes	0.380	0.584	- 0.205
Advanced fermentation	A 10	Wood residues and Agri wastes	0.509	0.447	0.063
CO <sub>2</sub> co-valorization and biomass waste	A 11	Combination of Industrial waste gases CO <sub>2</sub> and wood residues	0.605	0.365	0.25

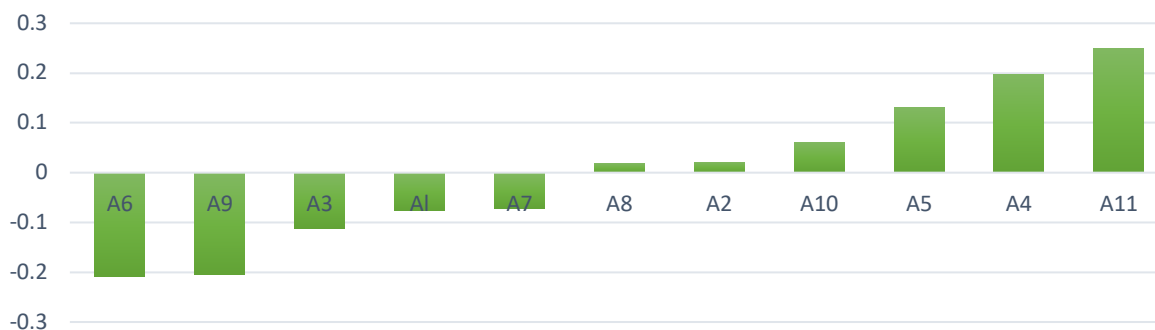


Figure 8. MCDM Ranks Sustainable Aviation Fuel Production Methods

### 4.3. Comparison of MCDM Methodologies

The rank order produced with TOPSIS and VIKOR using fuzzy methodologies is shown in Table 5. Here, A4 and A5 were consistently placed in the highest 3 by both techniques. However, A6 and A9 were consistently ranked in the lowest three. Nevertheless, due to variations in the theoretical basis of both methods, the ranks given to A3 and A11 in both methodologies are distinct.

Table 5 Fuzzy VIKOR and TOPSIS for Sustainable Fuel Production Method Ranking Source

		Alternate rank order										
		Poor						Strong				
	<b>VIKOR</b>	A3	A9	A6	A8	A7	A11	A10	A1	A2	A5	A4
	<b>TOPSIS</b>	A9	A6	A7	A8	A3	A10	A2	A1	A5	A4	A11

### 5. Conclusions

The airline industry’s efforts to reduce CO<sub>2</sub> emissions and find new sources of jet fuel have the chance to benefit significantly when using sustainable fuels in aviation. SAF could be produced in various methods, making choosing a particular route a challenging strategic choice. Utilizing TEA or LCA research, the existing literature compares the effectiveness of one or more methods. This study proposed a comprehensive assessment approach for the SAF selection problem.

#### 5.1. Implications

This research used a stakeholder engagement strategy to collaborate with professionals to create a comprehensive structure based on evaluation criteria including societal, environmental, economic, and technological factors. To determine the most important factors for investment/production/purchase/usage of SAF, this study created a questionnaire to obtain stakeholders’ opinions. In-depth conversations with industry professionals confirmed the criterion. Industry professionals were given another form to rate SAF production methods according to a performance criterion. Data is validated using fuzzy TOPSIS and fuzzy VIKOR and PROMETHEE to reduce professionals’ judgmental personal prejudice.

The analysis concluded that economic and environmental considerations outweigh technological and social considerations. The focus on these two groups is logical given that SAFs are marketed as having less harmful environmental consequences than normal Jet-A fuel yet, serve as a more expensive alternative. Greenhouse gas reductions, sustainability on feedstocks, minimum selling price, compatibility of jet fuel, and traceability of sustainable aviation fuel are the essential performance factors for rating their production methods. A comparison of sustainable production methods based solely on one criterion reveals that no single production method dominates the 24 assessment criteria. In addition, various results are observed when examining each effect category separately in mono-criteria rankings. HEFA-based output scores highest in economic effects. This conclusion should be interpreted cautiously, as HEFA appears to be a viable opportunity among the remaining 3 impact categories. According to global rankings, gasification or Fischer-T synthesis, advanced fermentation, and hydrothermal liquefaction are the top conversion processes for SAFs. Although technologically developed and frequently used commercially, HEFA-based procedures are less desirable. It is noticeable that collected waste from gas, wood, and farms is superior feedstock when compared to algae or microalgae and purpose-grown seeds that are non-edible for oil extraction.

Animal fats or used cooking oil varieties are additional enticing options, but their restricted availability prevents them from increasing SAF production. The findings suggest integrating/designing/modifying the waste gases and leftovers supply chain for SAF production. The SAF production method analysis and ranking approach aid policymaking. A nation’s technical, feedstock, and economic conditions must guide SAF production methods.

Some countries, like Brazil, make SAF from sugarcane, whereas the United Kingdom has found that municipal solid waste and agricultural waste make the best feedstock for making SAF. To secure a consistent supply of raw materials to produce SAF, feedstock suppliers might receive monetary benefits. An improved feedstock supply chain will assist in minimizing the unpredictability in the production of SAF and ensure commercial stability for both feedstock providers and the SAF production companies. Technology-wise, strengthening SAF production paths and R&D capacities will boost economic competitiveness and the bioeconomy. These competencies would be sold to other countries.

In addition, as indicated in the research, the plant capital investment of the SAF production method is a critical factor. In this regard, it is recommended to simplify and underwrite debt or equity funding by state governments. This scenario will increase the trust of private capitalists, allowing new investors and establishing refineries providing biofuel for road transportation to incorporate SAF into their business models. The results of this research may also be used to develop policy choices such as production or buying quotas from a particular SAF production method, taxes on standard jet fuel (creating a comparable environment for that SAF production method), including subsidies for sustainable production of aviation fuels.

Conclusively, as indicated by Trejo-Pech et al., (2019) SAF production can be regarded as a catalyst for creating national climate change policies. In conclusion, it is anticipated that policymakers and decision-makers will consider the research results when investing or making a policy decision about SAF production methods. These findings raise new research questions. For instance, it could be intriguing to examine conflicts across all the societal, economic, technological, and environmental criteria. It is also intended to integrate more synthetic methods for SAF production and a range-based technique to investigate ranking distribution.

### Contribution of Researchers

**Ibrahim Temam Ibrahim:** Methodology, Conceptualization, Analysis, Data collection and curation. **Ali Osman Kusakci:** Supervision, Validation, Formal analysis. **Amna Abdullah:** Writing, Reviewing and Editing.

### Conflicts of Interest

The authors declared that there is no conflict of interest.

### References

- Ahmad, S., Nadeem, A., Akhanova, G., Houghton, T., & Muhammad-Sukki, F. (2017). Multi-criteria evaluation of renewable and nuclear resources for electricity generation in Kazakhstan. *Energy*, *141*, 1880–1891. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.102>
- Alkema, B., R. G. (2022). *Aviation's net-zero ambitions meet resistance in the run-up to COP26 -le*. <https://runwaygirlnetwork.com/2021/10/aviations-net-zero-ambitions-meet-resistance-cop26/>
- Atag.org. (2022). *Air Transport Action Group. (2020, September). Facts and figures*. [www.atag.org/facts-figures.html](http://www.atag.org/facts-figures.html)
- Atsonios, K., Kougioumtzis, M.-A., D. Panopoulos, K., & Kakaras, E. (2015). Alternative thermochemical routes for aviation biofuels via alcohols synthesis: Process modeling, techno-economic assessment and comparison. *Applied Energy*, *138*, 346–366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.056>
- aviationbenefits.org. (2022). *Air Transport Action Group. (2021). Waypoint 2050.tle*. <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>
- Awasthi, A., Govindan, K., & Gold, S. (2018). Multi-tier sustainable global supplier selection using a fuzzy AHP-VIKOR based approach. *International Journal of Production Economics*, *195*, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.013>
- Bann, S. J., Malina, R., Staples, M. D., Suresh, P., Pearlson, M., Tyner, W. E., Hileman, J. I., & Barrett, S. (2017). The costs of production of alternative jet fuel: A harmonized stochastic assessment. *Bioresource Technology*, *227*, 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.032>
- Baudry, G., Macharis, C., & Vallée, T. (2018). Can microalgae biodiesel contribute to achieve the sustainability objectives in the transport sector in France by 2030? A comparison between first, second and third generation biofuels through a range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. *Energy*, *155*, 1032–1046. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.038>
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). Note—A Preference Ranking Organisation Method. *Management Science*, *31*(6), 647–656. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.6.647>
- CAAFI. (n.d.). *Fuel Qualification. (2022b)*. Retrieved December 13, 2022, from [https://www.caafi.org/focus\\_areas/feedstocks.html](https://www.caafi.org/focus_areas/feedstocks.html)
- CAAFI. (2019). *Etihad Airways Flies from Abu Dhabi to Amsterdam on AJF Blend from Halophytes*. <https://caafi.org/news/NewsItem.aspx?id=10442>
- Castello, D., Haider, M. S., & Rosendahl, L. A. (2019). Catalytic upgrading of hydrothermal liquefaction



- biocrudes: Different challenges for different feedstocks. *Renewable Energy*, 141, 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.003>
- Chen, Y.-K., Lin, C.-H., & Wang, W.-C. (2020). The conversion of biomass into renewable jet fuel. *Energy*, 201, 117655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117655>
- Cheng, F., & Brewer, C. E. (2017). Producing jet fuel from biomass lignin: Potential pathways to alkyl-benzenes and cycloalkanes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 673–722. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.030>
- Chevron Products Company. (2004). *Aviation Fuels Technical Review*. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/aviation-tech-review.pdf>
- Chiaromonti, D. (2019). Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. *Energy Procedia*, 158, 1202–1207. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.308>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Dayton, D. C., & Foust, T. D. (2020). Alternative Jet Fuels. In *Analytical Methods for Biomass Characterization and Conversion* (pp. 147–165). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815605-6.00010-X>
- de Jong, S., Hoefnagels, R., Faaij, A., Slade, R., Mawhood, R., & Junginger, M. (2015). The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(6), 778–800. <https://doi.org/10.1002/bbb.1613>
- Diederichs, G. W., Ali Mandegari, M., Farzad, S., & Görgens, J. F. (2016). Techno-economic comparison of biojet fuel production from lignocellulose, vegetable oil and sugar cane juice. *Bioresource Technology*, 216, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.090>
- Dožić, S. (2019). Multi-criteria decision making methods: Application in the aviation industry. *Journal of Air Transport Management*, 79, 101683. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2019.101683>
- Dyk, S. van. E. C. R. (2021). *ReFuelEU Aviation proposal details SAF blending obligation on fuel suppliers*. <https://www.greenairnews.com/?p=1374>
- Efroymson, R. A., Dale, V. H., & Langholtz, M. H. (2017). Socioeconomic indicators for sustainable design and commercial development of algal biofuel systems. *GCB Bioenergy*, 9(6), 1005–1023. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12359>
- Fiorese, G., Catenacci, M., Verdolini, E., & Bosetti, V. (2013). Advanced biofuels: Future perspectives from an expert elicitation survey. *Energy Policy*, 56, 293–311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.061>
- Fortier, M.-O. P., Roberts, G. W., Stagg-Williams, S. M., & Sturm, B. S. M. (2014). Life cycle assessment of bio-jet fuel from hydrothermal liquefaction of microalgae. *Applied Energy*, 122, 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.077>
- Ganguly, I., Pierobon, F., Bowers, T. C., Huisenga, M., Johnston, G., & Eastin, I. L. (2018). ‘Woods-to-Wake’ Life Cycle Assessment of residual woody biomass based jet-fuel using mild bisulfite pretreatment. *Biomass and Bioenergy*, 108, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.041>
- Gegg, P., & Wells, V. (2017). UK Macro-Algae Biofuels: A Strategic Management Review and Future Research Agenda. *Journal of Marine Science and Engineering*, 5(3), 32. <https://doi.org/10.3390/jmse5030032>
- Geleynse, S., Jiang, Z., Brandt, K., Garcia-Perez, M., Wolcott, M., & Zhang, X. (2020). Pulp mill integration with alcohol-to-jet conversion technology. *Fuel Processing Technology*, 201, 106338. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106338>
- Heyne, J., Rauch, B., Le Clercq, P., & Colket, M. (2021). Sustainable aviation fuel prescreening tools and procedures. *Fuel*, 290, 120004. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120004>
- Hileman, J. I., & Stratton, R. W. (2014). Alternative jet fuel feasibility. *Transport Policy*, 34, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.018>
- IATA. (2019). *Sustainable Aviation Fuels Fact sheet*. <https://www.iata.org/contentassets/ed476ad1a80f4ec7949204e0d9e34a7f/fact-sheet-alternative-fuels.pdf>



- ICAO. (2016). *Environmental Report*. [www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx](http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/env2016.aspx).
- ICAO. (2022). *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. [www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx](http://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx)
- IEA. (2022). *Aviation – Analysis*. <https://www.ica.org/reports/aviation>
- International Civil Aviation Organization. (2019). *Trends in Emissions that Affect Climate Change*. [https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange\\_Trends.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/ClimateChange_Trends.aspx)
- International Civil Aviation Organization. (2022). *COVID-19 impacts and 2022 CORSIA periodic review*. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-and-Covid-19.aspx>
- International Civil Aviation Organization. (2021). <https://bit.ly/3ruI5p8>
- Kivits, R., Charles, M. B., & Ryan, N. (2010). A post-carbon aviation future: Airports and the transition to a cleaner aviation sector. *Futures*, 42(3), 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2009.11.005>
- Klein, B. C., Chagas, M. F., Junqueira, T. L., Rezende, M. C. A. F., Cardoso, T. de F., Cavalett, O., & Bonomi, A. (2018). Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. *Applied Energy*, 209, 290–305. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.079>
- Kolosz, B. W., Luo, Y., Xu, B., Maroto-Valer, M. M., & Andresen, J. M. (2020). Life cycle environmental analysis of ‘drop in’ alternative aviation fuels: a review. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(7), 3229–3263. <https://doi.org/10.1039/C9SE00788A>
- Lanzini, P., Testa, F., & Iraldo, F. (2016). Factors affecting drivers’ willingness to pay for biofuels: the case of Italy. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2684–2692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.080>
- Li, X., Mupondwa, E., & Tabil, L. (2018). Technoeconomic analysis of biojet fuel production from camelina at commercial scale: Case of Canadian Prairies. *Bioresource Technology*, 249, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.183>
- Lokesh, K., Sethi, V., Nikolaidis, T., Goodger, E., & Nalianda, D. (2015). Life cycle greenhouse gas analysis of biojet fuels with a technical investigation into their impact on jet engine performance. *Biomass and Bioenergy*, 77, 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.005>
- Michailos, S. (2018). Process design, economic evaluation and life cycle assessment of jet fuel production from sugar cane residue. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(3), 1227–1235. <https://doi.org/10.1002/ep.12840>
- Moniruzzaman, M., Yaakob, Z., Shahinuzzaman, M., Khatun, R., & Aminul Islam, A. K. M. (2017). Jatropa Biofuel Industry: The Challenges. In *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64979>
- Moore, R. H., Thornhill, K. L., Weinzierl, B., Sauer, D., D’Ascoli, E., Kim, J., Lichtenstern, M., Scheibe, M., Beaton, B., Beyersdorf, A. J., Barrick, J., Bulzan, D., Corr, C. A., Crosbie, E., Jurkat, T., Martin, R., Riddick, D., Shook, M., Slover, G., ... Anderson, B. E. (2017). Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature*, 543(7645), 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature21420>
- Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2018). Techno-economic and environmental analysis of aviation biofuels. *Fuel Processing Technology*, 171, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.09.022>
- O’Connell, A., Kousoulidou, M., Lonza, L., & Weindorf, W. (2019). Considerations on GHG emissions and energy balances of promising aviation biofuel pathways. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 504–515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.033>
- O’Malley, J., Pavlenko, N., and Searle, S. (2021). *Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand*. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf>
- Palmer, W. (2021). *United Flies World’s First Passenger Flight On 100% Sustainable Aviation Fuel Supplying One of Its Engines*. <https://www.ge.com/news/reports/united-flies-worlds-first-passenger-flight-on-100-sustainable-aviation-fuel-supplying-one>
- Reuters. (2021). *current targets on sustainable aviation fuel “pathetic.”* <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/uks-johnson-says-current-targets-sustainable-aviation->

[fuel-pathetic-2021-11-02/](#)

Ribeiro, L. A., Pereira da Silva, P., Ribeiro, L., & Dotti, F. L. (2017). Modelling the impacts of policies on advanced biofuel feedstocks diffusion. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2471–2479. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.027>

Ricardo Energy and Environment. (2020). *Targeted Aviation Advanced Biofuels Demonstration Competition – Feasibility Study Final Report for Department for Transport, UK*. <https://docslib.org/doc/10188308/targeted-aviation-advanced-biofuels-demonstration-competition-feasibility-study-final-report-report-for-department-for-transport-uk>

Ritchie, H. (2020). *Climate change and flying: what share of global CO2 emissions come from aviation?* <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-aviation>

Schäfer, A. W., Barrett, S. R. H., Doyme, K., Dray, L. M., Gnad, A. R., Self, R., O’Sullivan, A., Synodinos, A. P., & Torija, A. J. (2018). Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft. *Nature Energy*, 4(2), 160–166. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0294-x>

Scheelhaase, J., Maertens, S., & Grimme, W. (2019). Synthetic fuels in aviation – Current barriers and potential political measures. *Transportation Research Procedia*, 43, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.015>

Schillo, R. S., Isabelle, D. A., & Shakiba, A. (2017). Linking advanced biofuels policies with stakeholder interests: A method building on Quality Function Deployment. *Energy Policy*, 100, 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.09.056>

Seber, G., Malina, R., Pearlson, M. N., Olcay, H., Hileman, J. I., & Barrett, S. R. H. (2014). Environmental and economic assessment of producing hydroprocessed jet and diesel fuel from waste oils and tallow. *Biomass and Bioenergy*, 67, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.04.024>

Shahabuddin, M., Alam, M. T., Krishna, B. B., Bhaskar, T., & Perkins, G. (2020). A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes. *Bioresource Technology*, 312, 123596. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123596>

Shahmardan, A., & Hendijani Zadeh, M. (2013). An integrated approach for solving a MCDM problem, combination of entropy fuzzy and F-PROMETHEE techniques. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 6(4), 1124–1138. <https://doi.org/10.3926/jiem.899>

Sikarwar, V. S., Zhao, M., Fennell, P. S., Shah, N., & Anthony, E. J. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 189–248. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.04.001>

SkyNRG. (2020). *Technology | Sustainable Aviation Fuel*. <https://skynrg.com/sustainable-aviation-fuel/technology/>

Staples, M. D., Malina, R., Suresh, P., Hileman, J. I., & Barrett, S. R. H. (2018). Aviation CO2 emissions reductions from the use of alternative jet fuels. *Energy Policy*, 114, 342–354. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.12.007>

The Royal Society. (2019). *Sustainable synthetic carbon based fuels for transport*. <https://royalsociety.org/-/media/policy/projects/synthetic-fuels/synthetic-fuels-briefing.pdf>

Timperley, J. (2021). *The Fastest Ways Aviation Could Cut Emissions*. <https://www.bbc.com/future/article/20210525-how-aviation-is-reducing-its-climate-emissions>

Trejo-Pech, C. O., Larson, J. A., English, B. C., & Yu, T. E. (2019). Cost and Profitability Analysis of a Prospective Pencyress to Sustainable Aviation Fuel Supply Chain in Southern USA. *Energies*, 12(16), 3055. <https://doi.org/10.3390/en12163055>

Trivedi, P., Olcay, H., Staples, M. D., Withers, M. R., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Energy return on investment for alternative jet fuels. *Applied Energy*, 141, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.016>

United Nations. (2015). *The Paris Agreement*. <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>

US Dept. Of energy. (2020). *Sustainable Aviation Fuel Review of Technical Pathways*. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2020/09/f78/beto-sust-aviation-fuel-sep-2020.pdf>

Wang, Z., Pashaei Kamali, F., Osseweijer, P., & Posada, J. A. (2019). Socioeconomic effects of aviation biofuel production in Brazil: A scenarios-based Input-Output analysis. *Journal of Cleaner Production*, 230, 1036–1050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.145>

World Economic Forum. (2020). *Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation*. <https://www.weforum.org/reports/clean-skies-for-tomorrow-sustainable-aviation-fuels-as-a-pathway-to-net-zero-aviation>

Zemanek, D., Champagne, P., & Mabee, W. (2020). Review of life-cycle greenhouse-gas emissions assessments of hydroprocessed renewable fuel from oilseeds. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 14(5), 935–949. <https://doi.org/10.1002/bbb.2125>

Zhang, H., Fang, Y., Wang, M., Appels, L., & Deng, Y. (2020). Prospects and perspectives foster enhanced research on bio-aviation fuels. *Journal of Environmental Management*, 274, 111214. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111214>

Zhang, H., Wang, L., Van herle, J., Maréchal, F., & Desideri, U. (2020). Techno-economic evaluation of biomass-to-fuels with solid-oxide electrolyzer. *Applied Energy*, 270, 115113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115113>

## APPENDIX

Table A1: Details of the Expert Pool

Participants	Years of Expertise	Department	Job Role	Company
Participant 1	5+	Supply chain	Supply Chain Executive	Shell Aviation
Participant 2	5+	Supply chain	Supply Chain Assistant	BP Aviation
Participant 3	10+	Supply chain	Supply Chain Operations Manager	Total Energies
Participant 4	6	Supply chain	Supply Chain Coordinator	Lufthansa Aviation Fuel
Participant 5	8	Supply chain	Supply Chain Assistant	Sky tanking
Participant 6	5	Supply chain	Supply Chain Administrator	Air BP
Participant 7	6	Supply chain	Supply Chain Specialist	World Fuel Services
Participant 8	5	Supply chain	Downstream Purchasing Assistant	CEPSA
Participant 9	12	Supply chain	Supply Chain Manager	ExxonMobil Aviation
Participant 10	7	Supply chain	Supply Chain Executive	Gazpromneft-Aero.
Participant 11	6	Supply chain	Supply Chain Analyst	Shell Aviation
Participant 12	9	Supply chain	Supply Chain Coordinator	BP Aviation
Participant 13	14	Supply chain	Supply Chain Assistant Manager	TotalEnergies
Participant 14	10+	Supply chain	Supply Chain Manager	Lufthansa Aviation Fuel
Participant 15	8+	Supply chain	Supply Chain Operations Coordinator	Sky tanking
Participant 16	6	Supply chain	Supply Chain Specialist	Air BP
Participant 17	7	Supply chain	Fuel Supply Coordinator	ExxonMobil Aviation
Participant 18	5	Supply chain	Supply Chain Coordinator	ExxonMobil Aviation
Participant 19	17	Supply chain	Supply Chain Manager	Gazpromneft-Aero
Participant 20	8+	Supply chain	Downstream Procurement Manager	CEPSA
Participant 21	7+	Supply chain	Supply Chain Coordinator	Air BP

Participant 22	12+	Supply chain	Fuel Executive	Supply	World Services	Fuel
----------------	-----	--------------	----------------	--------	----------------	------

Table A2: References to the Evaluation Criterion

Category	Selected Criterion	Citation
Social	Traceability	(Lanzini et al., 2016).
	Economical contribution	(Wang et al., 2019).
	Food safety	(Sikarwar et al., 2017) .
	Social acceptance	(Gegg & Wells, 2017).
Environmental	Sustainability on feedstock	(Chiaramonti, 2019).
	Savings on GHG emissions	(Zemanek et al., 2020).
	The impact caused by a change in land usage	(Lanzini et al., 2016).
	Water and Soil pollution	(Efroymsen et al., 2017).
Economic	Alternative uses with feedstock	(Hileman & Stratton, 2014).
	Profitability of feedstock	(Klein et al., 2018).
	Minimal price for selling	(Ribeiro et al., 2017).
	Input energy usage	(Baudry et al., 2018).
	Productivity of Land	(Li et al., 2018).
	Operational and maintenance costs	(Diederichs et al., 2016).
	Cost on feedstock	(de Jong et al., 2015).
	Cost of plant capital	(Moore et al., 2017).
Technical	Blending limits	(Cheng & Brewer, 2017).
	Compatibility with Standard jet fuels	(Hileman & Stratton, 2014).
	Local technical capability	(Neuling & Kaltschmitt, 2018).
	Integration process	(Ahmad et al., 2017).
	Maturity of process technology	(Bann et al., 2017).
	Method yield	(Schillo et al., 2017).
	Scalability on production volume	(Atsonios et al., 2015).
	Composition and quality of feedstock	(Fiorese et al., 2013).



# Journal of Turkish Operations Management

## Sanal gerçeklik uygulamalarında bulanık mantık yaklaşımı: sistematik derleme

Azize Sudan Aran<sup>1\*</sup>, Ergün Eraslan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sağlık Bilimleri Fakültesi İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl  
asudan@bingol.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9592-2937>

<sup>2</sup>Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara  
eraslan@ybu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5667-0391>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 10.10.2023  
Revize: 18.03.2024  
Kabul: 07.04.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Bulanık mantık,  
Sanal Gerçeklik,  
Artırılmış Gerçeklik

### Özet

Sanal Gerçeklik teknolojisi son yıllarda hayatın her alanında kullanılmaya başlanan yeni bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. Yeni bir teknolojinin getirdiği belirsiz alanlar ve potansiyelinin henüz tam olarak bilinmeyişi bu alandaki araştırmaların artmasına zemin hazırlamıştır. Sanal Gerçeklikte Bulanık Mantık Yaklaşımının kullanılması da bu araştırma alanlarından biri olmuştur. Bulanık mantığın belirsizlik içeren kontrol ve karar verme süreçlerindeki başarısı, sanal gerçeklik teknolojisine entegrasyonunda etkili olmuştur. Sanal ortam, araç ve eğitim ortamlarının tasarlanma süreçlerindeki kontrol ve karar verme süreçleri bu yöntemin kullanılması için çok elverişlidir. Çalışmada son yirmi yıllık süreçte bulanık mantık yaklaşımına dayanan sanal gerçeklik alanındaki çalışmalar incelenerek, ilgili yazın taraması hakkında değerlendirmelerde bulunulmuştur.

## Fuzzy Logic Approach in Virtual Reality Applications: Systematic Review

### Article Info

#### Article History:

Received: 10.10.2023  
Revised: 18.03.2024  
Accepted: 07.04.2024

#### Keywords:

Fuzzy Logic,  
Virtual Reality,  
Augmented Reality

### Abstract

Virtual Reality technology has emerged as a new technology that has been used in all areas of life in recent years. The uncertain areas brought by a new technology and the fact that its potential is not yet fully known has paved the way for an increase in research in this field. The use of Fuzzy Logic Approach in Virtual Reality has also been one of these research areas. The success of fuzzy logic in control and decision-making processes involving uncertainty has been effective in its integration into virtual reality technology. Control and decision-making processes in the design processes of virtual environments, tools and educational environments are very convenient for using this method. In our study, the studies in the field of virtual reality based on fuzzy logic approach in the last twenty years have been examined and evaluations have been made about the relevant literature review.

## 1. Giriş

Sanal Gerçeklik (SG), bilgisayar ortamında oluşturulmuş, gerçeklik hissi oluşturan ve yapay zekâ ile bilgi araçlarının birleştirildiği ortamlarda, kullanıcı etkileşimlerini içeren bir teknoloji olarak tanımlanmıştır (Emre, Selçuk, Budak, Bütün ve Şimşek, 2019). SG simülatorleri, 19. Yüzyılın başlarında, ilk olarak savaş ve havacılık gibi alanlarda kullanılmaya başlanmıştır (Issenberg, Gordon, Gordon, Safford, & Hart, 2001). Savaş oyunu fikri ile ortaya çıkan ilk simülatorler, bu oyunların ordu ve donanma stratejilerinin gelişimini sağlamak amacıyla kullanılması ile geliştirilmiştir. Simülasyon tarihindeki ikinci gelişme 1920'lerde Edward Albert Link'in ilk uçak simülatorünü geliştirmesi ile olmuştur (Yıldırım, Özer, Kocaağalar, & Bölüktaş, 2019). Uçuş simülatorlerinin geliştirilmesi ile bu simülatorler pilotları zorlu hava koşulları ve acil durumlar ile başa çıkma konusunda hazırlamak, savaş esnasında birliklerin etkin yönetimini sağlamak gibi amaçlarla kullanılmıştır (Issenberg vd. 2001). 1950'li yıllarda ise ilk tıbbi simülatorler modellenmiştir (Yıldırım vd. 2019). 1960'lı yılların sonlarına doğru, başa takılan ekranları geliştirilmesi ve uygulanması ile günümüzdeki SG sistemlerinin şekillenmesinde önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Başa takılan ekranların kullanılmaya başlanması ile bu teknolojilerinin kullanımının başta tıp eğitimi olmak üzere çeşitli eğitim süreçlerinde kullanımının faydalı olduğu bulunmuştur (Issenberg vd. 2001). Sektörlere özgü uygulama alanlarında karşılaşılan zorluklarla baş etmede sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik uygulamaları iyi çözümler sunmaktadır. Örneğin; askeri alanda savunma stratejilerinin oluşturulmasında, planlama ve koordinasyon faaliyetlerinde bu teknolojilerin kullanılması giderek yaygınlaşmaktadır. Yine sağlık alanında, zorlu ve hata toleransı olmayan müdahalelerde, sanal ortamlar aracılığı ile deneyim kazanılmasının katkısı büyüktür. Sanal gerçeklik teknolojisi deneyim kazanma konusunda motivasyon sağlayarak, kaygı ve endişeden uzak bir eğitim ortamı oluşturmaktadır. Bu yönü ile havacılık sektöründe verilen eğitimlerde de sanal gerçeklik başarılı sonuçlar vermektedir (Demir, Yılmaz & Paksoy, 2020; Polat ve Yılmaz, 2023).

Günümüze gelindiğinde düşük maliyetli donanımların piyasaya sürülmesi ile birlikte, bu teknoloji daha geniş bir kitle için erişilebilir hale gelmiştir. SG teknolojileri eğitimden sağlığa, lojistikten mimariye, turizmden eğlenceye kadar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır (Şekerci, 2017). Son on yılda SG teknolojilerinin kullanımında sektörel çeşitliliğin artması, sanal ortam ürün çeşitliliğinin ve yeni araştırmaların artışı da beraberinde getirmiştir. Yeni bir teknolojinin getirdiği belirsiz alanlar, tasarım ve geliştirmede karşılaşılan karmaşık problemler göz önüne alındığında; bulanık mantık yaklaşımının sanal gerçekliğe entegrasyonu kaçınılmazdır. Bulanık mantık, insanların tecrübelerinden elde ettiği bilgiyi işleyerek, belirli matematiksel fonksiyonların yardımı ile sonuç çıkarımları yapmaktadır ve daha çok belirsizlik içeren kontrol ve karar verme süreçlerinde kullanılmaktadır (Keskenler ve Keskenler, 2017).

Bulanık mantığın temelde sağladığı avantajlar; insan düşünce sistemine ve tarzına yakın olması, uygulamasında mutlaka matematiksel bir modele gereksinim duymaması, yazılımın basit olması nedeniyle, sistemin daha ekonomik olarak kurulabilmesine imkân sağlaması, anlaşılabilir olması, üyelik değerlerinin kullanımı sayesinde, diğer kontrol tekniklerine göre daha esnek olması, kesinlik arz etmeyen bilgilerin kullanımına imkân sağlaması, doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesine imkân sağlaması, sadece uzman kişilerin tecrübelerinden faydalanılarak, kolaylıkla bulanık mantığa dayalı bir modelleme ya da sistem tasarlanabilmesi, geleneksel kontrol teknikleriyle uyum halinde olması, insanların iletişimde kullandıkları sözel ifadelerin bulanık mantıkta kullanımı ile daha olumlu sonuçlar ortaya koyması olarak sıralanabilir (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003). Bulanık mantık yönteminin bu avantajları sayesinde, son zamanlarda sanal gerçeklik alanında bulanık yaklaşım ile ilgili araştırmaların arttığı ve konuya olan ilginin artarak devam ettiği söylenebilir.

### 1.1. Bulanık Mantık Kavramı

Günlük hayatta kullandığımız dilde sıklıkla belirsiz yapılar yer veririz. Bir şey anlatırken, bir şey isterken kullandığımız bu belirsiz yapılar bulanık ifade olarak açıklanır. Sıcak, soğuk, ılık, yaşlı, genç, hızlı, yavaş, çok, az, biraz gibi birçok terim bulanık ifadelerle örnek olarak gösterilebilir. Sayısal ve sözel değerleri ifade edebildiğimiz bulanık terimler kesinlik belirtmeyen ifadelerdir (Altaş, 1999). Havanın durumunu anlatırken, birinin yaşını tayin ederken veyahut aracın hızını ifade ederken kesinlik içermeyen bu terimleri sıklıkla kullanırız. Hava sıcaklığına göre gerekli önlemleri alırken, aracın hızına göre fren gaz idaresini sağlarken, ortamın fiziksel koşullarına göre gerekli ayarlamaları sağlarken bulanık mantıktan yardım alırız. Bunun gibi belirsiz ve kesinlik içermeyen durumlarda insan beyninin davranış şekli ve olayları değerlendirip karar verme süreci bulanık mantığa temel olmuştur (Altaş, 1999).

Bulanık mantık düşüncesini ilk olarak 1965 yılında Zadeh önermiştir. Zadeh'in "bulanık küme" kavramı, klasik sistem kuramının matematiksel yöntemlerinin gerçek dünyadaki pek çok sistemde, özellikle de işin içine insanları



alan, kısmen karmaşık sistemlerde yetersiz kalmasından ortaya çıkmıştır (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003). Bulanık mantık standart sayısal sistemlerde kullanılan sıfır ve bir seviyeleri yerine, üyelik fonksiyonlarını kullanarak daha hassas çıktı verisi sunabilmektedir. Bu kuramın mühendislik veya diğer alanlarda uygulanmasındaki birincil amaç, kesin olmayan giriş verileri ışığında tutarlı sonuçlar elde edebilmektir (Işık, Kehya ve Kayabaşı, 2023).

Bulanık sistemler, bir karar verme süreci içerisinde birbiriyle ilişkili birden fazla faktörün katkılarının ağırlık faktörlerine göre kapsamlı bir şekilde ele alınması ve üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklığın azaltılması ile güzel sonuçlar vermektedir. Son dönemlerde bulanık sistemin mevcut doğrusal yöntemlerle birleşimini içeren çalışmalar yapılmaktadır. Bu sayede, çok kriterli yöntemler gibi sayısal yöntemler ile bulanık mantık gibi esnek çözüm sistemlerinin başarılı yönleri birleştirilebilecektir (Yılmaz ve Polat, 2023; Yıldızbaşı, Öztürk, Yılmaz & Arıöz, 2021; Yılmaz, 2023).

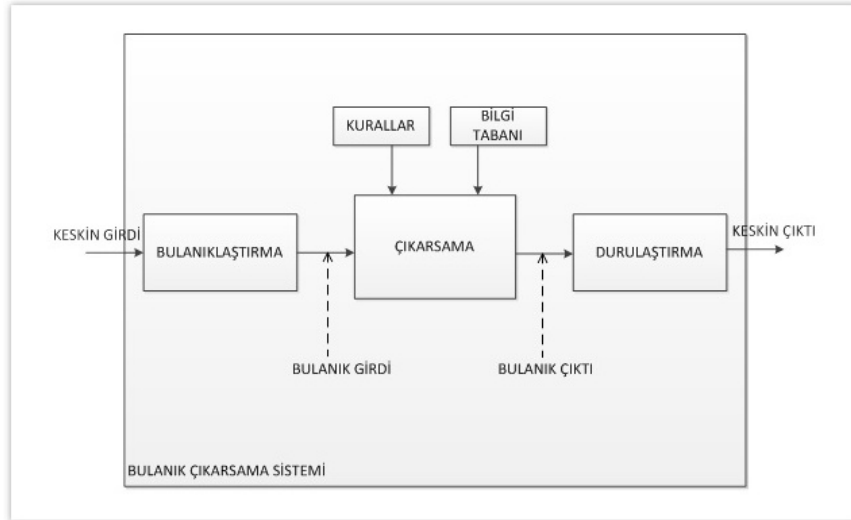
Çok kriterli karar verme teknikleri (ÇKKV), bir konuyu sağlıklı bir sonuca ulaştıran ve süreci hızlandıran etkili sayısal yöntemlerdir. ÇKKV yöntemlerinden analitik hiyerarşik proses (AHP), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity) ve VIKOR yöntemi bulanık mantık yaklaşımı ile birlikte ele alınan başlıca yöntemlerdir. AHP yöntemi, zorlukları farklı boyutlara göre ağırlıklandırarak önceliklendirmek için kullanılır. TOPSIS yöntemi, alternatiflerin (karar seçeneklerinin) değerlendirilmesi pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm olmak üzere iki temel noktaya dayanır. VIKOR yöntemi, çok kriterli karmaşık sistemlerin optimizasyonunda kullanılır. Bu yöntemde uzlaşık sıralama listesine veya uzlaşık çözüme karar verilir. Böylelikle, birbirleri ile çelişen kriterler arasında seçim veya sıralama yapmak daha kolay olur (Bircan, Demir, & Güvendi, 2020). AHP, TOPSIS, VIKOR gibi birçok klasik karar verme yönteminin karar setlerinde ya (1) mantığı vardır ya da yoktur (0). Ancak bulanık kümelerde 0-1 aralığında bir üyelik derecesinden bahsedilmektedir. Bu yöntemlerin, bulanık mantık yaklaşımı ile birlikte ele alınması, belirsiz durumların karar verme süreçlerinde başarılı sonuçlar vermektedir (Yıldızbaşı, Öztürk, Yılmaz & Arıöz, 2021; Yılmaz, 2023; Yılmaz ve Polat, 2023).

Yukarıda bahsedildiği gibi bulanık mantık yöntemi, birbiriyle ilişkili birden fazla faktörün katkılarının ağırlık faktörlerine göre kapsamlı bir şekilde ele alınması ve üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklığın azaltılması fikrine dayanmaktadır. Bulanık kapsamlı değerlendirme yöntemini kullanarak karar verme, birbirini takip eden üç aşamadan oluşur: ilk aşama, değerlendirme göstergeleri setini ve nesnenin derecelendirme seviyesi setini oluşturmaktır; ikinci aşama, her değerlendirme faktörünün ağırlık faktörünü ve üyelik vektörünü belirledikten sonra bulanık değerlendirme matrisini hesaplamaktır; son aşama, bulanık değerlendirme matrisi ve faktörlerin ağırlık vektörü üzerinde bulanık aritmetik esas alınarak nesne sınıfının belirlenmesidir (Öztürk & Paksoy, 2016).

## 1.2.Klasik Küme ve Bulanık Küme Kavramları

Gerçek hayattaki sistemlerin çoğu doğrusal olmayan sistemlerdir. Bulanık mantık, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde kullanılan yöntemlerden biri olarak literatürde yerini almıştır. Bulanık yaklaşım, doğrusal olmayan denetim yöntemleri içerisinde gerçek hayata daha yakın olan, daha doğal bir kural tabanı kullanarak çıktı sunduğu için diğer yöntemlerden ayrılmaktadır (Işık, Kehya ve Kayabaşı, 2023). Bu sayede endüstride kullanımı sistem performansını iyileştirip verimliliği arttırmaktadır (Kıyak ve Kahvecioğlu, 2003).

Bulanık bir süreç (bulanıklaştırma işlemi), genelde, üç ayrı birimden oluşmaktadır. Bu birimler; sırası ile bulanıklaştırıcı birim, kural işleme (çıkarsama) birimi, durulaştırıcı birim ve çıktı bilgileridir. Şekil 1'de genel bir bulanık sistem yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1. Bulanık Sistem Yapısının Genel Gösterimi (Öztürk & Paksoy, 2016).

### 1.3.Çalışmanın Amacı ve Önemi

Bulanık yöntem, bulanık matematiğin üyelik derecesi teorisine göre nitel değerlendirmeyi niceliksel değerlendirmeye dönüştürmeye olanak sağlar. Bu sayede bulanık ve ölçülmesi zor olan problemleri çözülmesini sağlar (Zhang, He ve Mitri, 2019). SG Teknolojisi 20. Yüzyılın sonlarında ortaya çıkan ve son 20 yıllık süreçte gelişen yeni bir teknolojisidir. Araştırmacılar sanal gerçeklik teknolojisinin kullanımı, geliştirilmesi, etkileri üzerine çeşitli çalışmalar yürütmektedir. Yeni bir teknoloji olması yönüyle SG teknolojisi hala birçok belirsiz alan barındırmaktadır. Belirsizliklerin matematiksel olarak ifade edilmesine olanak sağlayan bulanık mantık yönteminin SG teknolojisi çalışmalarında kullanılmasına imkân sağlamıştır. Son yıllarda yürütülen çalışmalar, bulanık mantık sistemleri gibi akıllı kontrol tekniklerinin, sanal gerçeklik uygulamalarının kontrol süreçlerinde kullanımının uygunluğunu araştırmaktadır. Birçok araştırmacı bulanık kontrol, bulanık değerlendirme yöntemlerini kullanarak sanal ürün, sanal ortam, sanal araç, sanal eğitim gibi konularda araştırmalar yürütmektedir. Ancak, literatürde yer alan bu çalışmaların analizini içeren çalışma sayısı sınırlıdır. Literatürdeki yer alan eksiklikler, bu çalışmanın çıkış noktasını oluşturmuştur. Son yirmi yıl içerisinde yayınlanmış bulanık mantığa dayalı sanal gerçeklik uygulamalarını içeren çalışmalar analiz edilmiş, sistematik derlemeye uygun şekilde sunulmuştur. Literatürdeki bulanık mantığa dayalı sanal gerçeklik çalışmalarının genel bir çerçevesinin sunulması, literatürdeki eksikliklerin ortaya konması yönüyle önemlidir. Bu sayede; yakın gelecekte eğitimden sağlığa her alanda yaygın şekilde kullanılacağı düşünülen bu teknolojinin, tüm yönleri ile incelenmesine olanak sağlanmaktadır. Bu derleme çalışmasının bu alanda gelecekte çalışacak araştırmacılar için bir yol haritası sunması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın 2. Bölümünde çalışmanın yöntemi açıklanmış ve taranan indeksler bazında, ulaşılan çalışma sayıları verilmiştir. Prizma kontrol listesi çerçevesinde çalışmaya dahil edilen kaynaklar 3. Bölümde detaylı olarak açıklanmıştır. Bulanık mantığa dayalı SG çalışmalarının hangi alanlarda yoğunlaştığı 4 Bölümde tartışılmıştır. Son olarak tartışma sonuçları ve öneriler ile çalışma tamamlanmıştır.

## 2. Yöntem

### 2.1.Araştırmanın Tasarımı

Çalışma sistematik derleme olarak tasarlanmıştır. 'Bulanık Mantık Yaklaşımına Dayanan Sanal Gerçeklik Çalışmaları' alanında yayınlanan araştırmalar incelenmiştir.

### 2.2. Veri Kaynağı ve Arama Kriterleri

Bu çalışma PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and MetaAnalyses) kriterlerine uygun olarak yapılmıştır. Bu doğrultuda; ERIC, IEEE Xplore, Scopus, Web of Science, Science Direct, Google Scholar ve TR Dizin veri tabanlarında, arama tarihinden itibaren son 20 yıl içinde Türkçe ve İngilizce dillerinde tarama yapılmıştır. Aramada "Sanal Gerçeklik ve Bulanık Mantık", "Virtual Reality and Fuzzy Logic" anahtar kelimeleri

kullanılmıştır. Çalışma 01.01.2003- 01.01.2023 yılları arasında yayınlanan araştırmaları kapsamaktadır. SG sistemlerinin son 20 yılda yaygınlaşmaya başlaması, SG ile ilgili kapsamlı çalışmaların 2000'li yıllarda yayınlanmaya başlaması, güncel araştırmaların SG sistemleri hakkında daha fazla bilgi içermesi ve daha eski çalışmalara ilişkin atıflara yer verilmesi nedeni ile kapsam son 20 yıl olarak sınırlandırılmıştır. Bulanık mantık yaklaşımı bağlamında SG ile ilgili yayınlar analize dâhil edilmiş, ilgili olmayanlar kapsam dışı bırakılmıştır. Özgün araştırma, derleme (sistemik veya kapsam belirleme), kitap bölümü, lisansüstü tez gibi akademik değeri olan yayınlar analize dâhil edilmiş, hakemli olmayan yayınlar kapsam dışında tutulmuştur. Tablo 1'de bu çalışmanın dâhil edilme ve hariç tutulma kriterleri özetlenmektedir (Abbas, O'Connor, Ganapathy, Isba, Payton, MgGrath & Bruce, 2023).

**Tablo 1.** Ekleme ve hariç tutma ölçütleri

Dâhil etme	Hariç Tutma
İngilizce ve Türkçe dilinde yayınlanan makaleler	İngilizce ve Türkçe dilleri dışında yayınlanan makaleler
Son 20 yılda yayınlanan makaleler	20 yıldan daha eski makaleler.
Özgün araştırma, derleme (sistemik veya kapsam belirleme), kitap bölümü, lisansüstü tez, rapor içeren hakemli yayınlar	Hakemli olmayan yayın, görüş makalesi, konferans katkısı özeti veya mektubu dâhil olmak üzere önemli olmayan katkı.
Tam metne erişim: evet	Tam metne erişim: hayır
Başlık, özet, anahtar kelimelerde bulanık mantık ve sanal gerçeklik sözcüklerini içermesi	Başlık, özet, anahtar kelimelerde bulanık mantık ve sanal gerçeklik sözcüklerini içermemesi
Bulanık mantık yaklaşımı bağlamında SG ile ilgili makale.	Bulanık mantık yaklaşımı bağlamında SG ile ilgili olmayan makale.

### 2.3. Veri Toplama Araçları ve Verilerin Değerlendirilmesi

2003-2023 tarihleri arasında yayınlanan ERIC (n=17), IEEE Xplore (n=114), Scopus (n=387), Web of Science (n=120), Scopus Science Direct (387), Google Scholar (n=46), Tr Dizin (n=0) adet çalışmaya ulaşılmıştır. Tekrarlayan çalışmalar filtrelendiğinde; yayınlanmış olan 684 çalışma incelenmiş ve araştırmanın amacına uygun olmayan çalışmalar dâhil edilmemiştir. Çalışmalar dışlama kriterleri çerçevesinde analiz edilerek konu ile ilgili araştırmalara ulaşılmaya çalışılmıştır. Dışlama kriterleri kapsamında adım adım dışlanan çalışmalara ilişkin veriler Tablo 2'de verilmiştir.

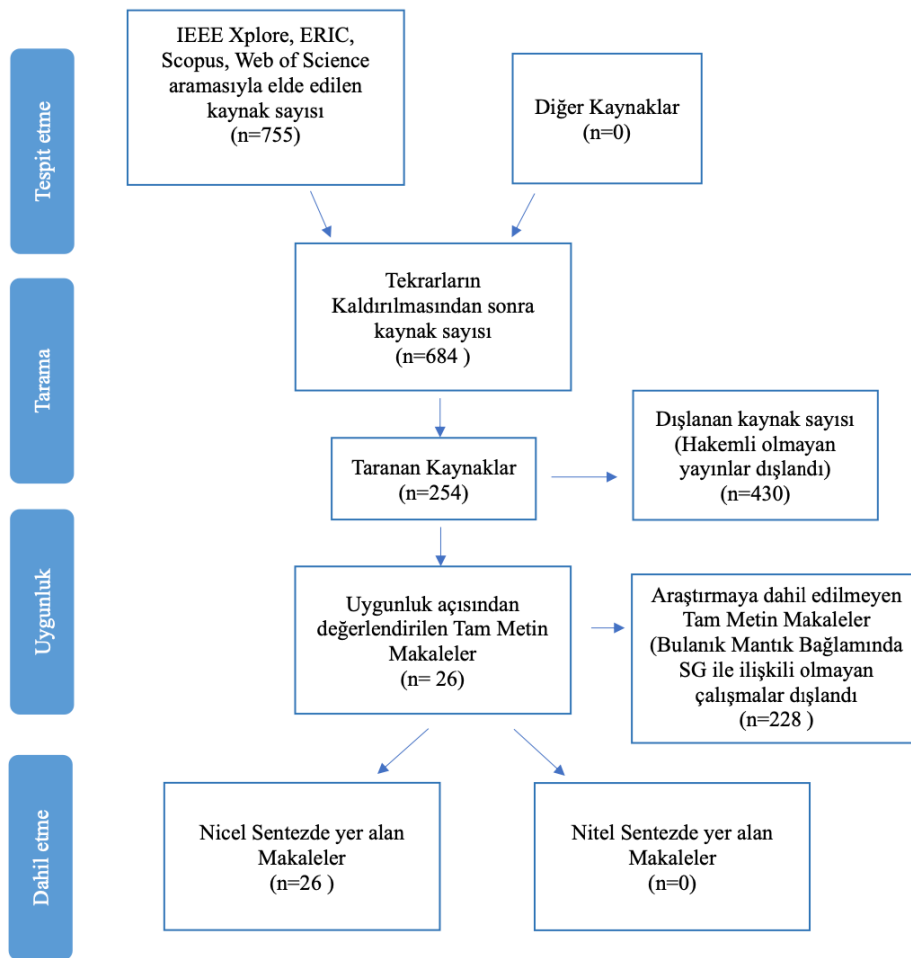
**Tablo 2.** Dışlama Kriterleri kapsamında Veri Tabanı Tarama

	ERIC	Web Of Science	Scopus & Science Direct	IEEE Xplore	Google Scholar	Tr Dizin	Toplam
<b>1. Adım:</b> Fuzzy Logic (Bulanık Mantık) ve Virtual Reality (Sanal Gerçeklik) anahtar kelimeleri ile 2003-2023 yılları arasında yapılan aramada ulaşılan kaynak sayısı	17	120	387	114	46	0	<b>684</b>
<b>2. Adım:</b> Özgün Araştırma- Derleme-Kitap Bölümü- Lisansüstü Tez içeren Hakemli yayınlar	9	54	134	11	46	0	<b>254</b>

<b>3. Adım:</b> Başlık, Özet, Anahtar Kelimelerde Bulanık Mantık ve Sanal Gerçeklik Sözcüklerinin bulunması, Bulanık Mantık Bağlamında Sanal Gerçeklik ile ilgili çalışmalar	3	10	6	7	0	0	26
--	---	----	---	---	---	---	----

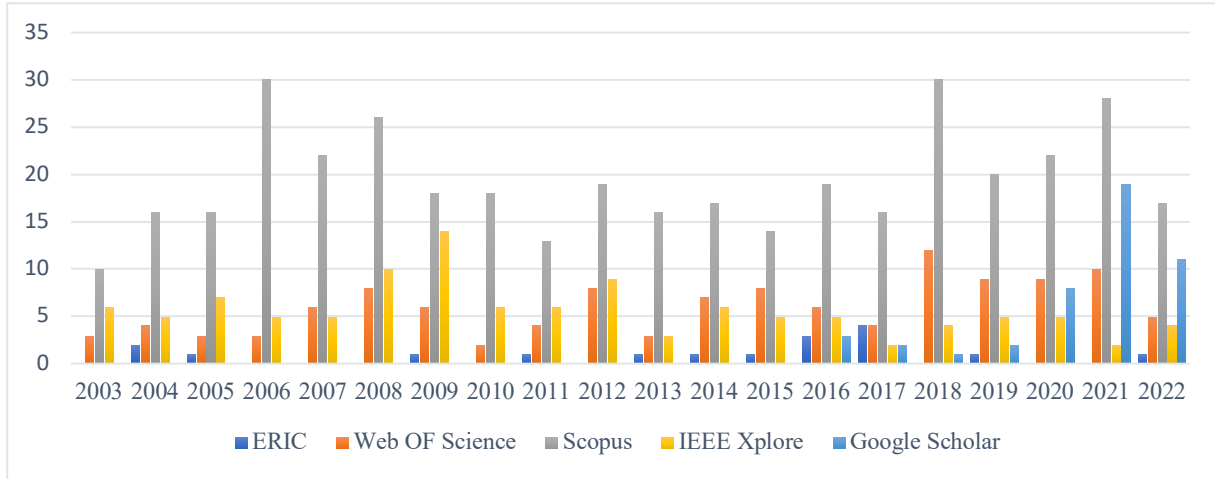
Elde edilen çalışmalar incelendiğinde; ilgili anahtar kelimeler kullanılarak yapılan yazın taramasında 684 çalışmaya ulaşıldığı görülmektedir. Çalışmalar Tablo 2’ de belirtilen dışlama kriterleri bağlamında dışlandığında ilgili çalışma sayısı 26 olarak bulunmuştur. Kaynak taramasına ilişkin prizma akış diyagramı Şekil 2 de gösterilmiştir.

Tarama sonucunda ulaşılan makaleler araştırmacılar tarafından dâhil edilme kriterleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Araştırmacılar değerlendirme sonuçlarını makale özet formuna işleyerek karşılaştırılmış ve konu ile uyumlu olanlar alınmıştır (Tablo 3). Makaleler değerlendirilirken araştırmacılar arasında fikir uyuşmazlığı yaşanmamıştır.



Şekil 2. Prizma Akış Diyagramı

Mükerrer çalışmaların kaldırılmasından sonra ulaşılan 684 çalışmanın yıllara göre analizi yapılmıştır. Bulanık mantık yaklaşımını kullanan sanal gerçeklik konulu yayınların veri tabanı bazında yıllara göre dağılımı Şekil 3’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Bulanık Mantık Yaklaşımını Kullanan Sanal Gerçeklik Konulu Yayınların Yıllara Göre Dağılımı

Şekil 3 incelendiğinde; Sanal Gerçeklikte bulanık yaklaşımı kullanan araştırmaların sayısının son beş yıl içerisinde arttığı ve bu araştırmaların, çalışmaya konu olan tüm veri tabanlarında taranmaya başladığı görülmektedir. SG teknolojisi alanındaki yeni gelişmelerin ve bu teknolojilerin son beş yıllık süreçte daha erişilebilir oluşunun araştırmacıların bu alanlara olan ilgisini arttırdığı söylenebilir.

## 2.4. Çalışmaların Uygunluğunun Değerlendirilmesi ve Analizlerin Geçerliliği

Çalışmada; makalelerin raporlama özelliklerini belirlemek ve sistematik incelemelerde şeffaflığı artırmak için geliştirilmiş, 27 maddelik PRISMA Bildirgesi Formu kullanılmıştır. Bu formda yer alan değerlendirme soruları sistematik derlemede olması gereken bölümlere göre sıralanmıştır: Başlık, Özet, Giriş, Yöntemler, Sonuçlar, Tartışma ve Fonlama Kaynakları (PRISMA, 2020; UNC Library, 2023). Bu değerlendirmeye göre incelenen 26 ilgili çalışma (başlık, özet, giriş, yöntem, sonuç ve tartışma yönünden) puanlanmıştır. Puanlama süreci iki yazar tarafından önce bağımsız sonra birlikte yapılmıştır. Her bir maddenin, değerlendirilen makaledeki bilgiyi karşılama durumu incelenerek tam uyumlu ise “1 puan”, uyumlu değilse “0 puan” olarak değerlendirilmiştir. PRISMA Bildirgesinden alınan toplam puan 26’dır. Çalışmaya uygun olmadığı için, 25. Madde ‘finansman’ değerlendirilme dışı tutulmuştur. Seçilen makalelerin Tablo 1’de belirtilen ve önceden tanımlanan seçim kriterlerine göre geçerliliğini sağlamak için tüm sonuçlar, çalışmadaki veri tabanlarını sıklıkla kullanan yetkin iki bağımsız hakem tarafından incelenmiştir.

**Tablo 3.** Sanal Gerçeklik ve Bulanık Mantık Yöntemi ile İlgili Çalışmalar

Sıra No	Çalışma Başlığı	Yıl	Yazar(lar)	Çalışmanın Amacı	Yöntem/ Ölçüm Araçları	Türü	Sonuçlar
1	Using Fuzzy Logic to Involve Individual Differences for Predicting Cybersickness during VR Navigation	2021	Wang Y, Chardonnet J, Merienne F, Ovtcharova J.	Bireysel Özelliklerin SG'in İnsan Üzerindeki Etkisinin Tahmininde Bulanık Mantık Yaklaşımının kullanılması	1-Mandami Çıkarım Sistemi, 2-Sugeno Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi	Sanal Gerçeklik Hastalığı	Sanal Gerçeklik Hastalığına olan yatkınlığın bireysel özelliklere göre (yaş, oyun tecrübesi, etnik köken değiştiğini bulmuşlardır.
2	A New Mixed-Reality-Based Teleoperation System for Telepresence and Maneuverability Enhancement	2020	Sun D, Kiselev, A, Liao Q, Stoyanov T, Loutfi A.	Yeni bir teleoperasyon sistemi geliştirmek için gerçek ve sanal dünyaları birleştiren karma gerçeklik sistemi ve kontrol algoritmalarının tasarımı	1-Bulanık Mantık Tabanlı Kontrol, 2-Lyapunov fonksiyonu yöntemi	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Bulanık Kontrollü denetim kullanan karma gerçeklik destekli uzaktan kontrol sistemlerinin geleneksel sistemden daha başarılı sonuçlar verdiğini bulmuşlardır.
3	Fuzzy comprehensive evaluation of virtual reality mine safety training system	2019	Zhang H, He X, Mitri H.	Sanal Gerçeklik Temelli Maden Güvenliği Eğitimlerinin Bulanık Yaklaşım ile Değerlendirilmesi	1-Bulanık Küme Teorisi, 2-Analitik Hiyerarşi Süreci	SG Temelli Eğitimler	SG temelli maden güvenliği eğitiminde, göstergelerin eğitim üzerindeki ağırlıklarını ve nicel verilerle desteklenmesi gerektiğini bulmuşlardır.
4	The role of EEG and EMG combined virtual reality gaming system in facial palsy rehabilitation - A case report	2019	Qidwai U, Ajimsha MS, Shakir M.	Yüz felcinin rehabilitasyonunda Elektrosefalogram (EEG) ve Elektromiyografi (EMG) kombine Sanal Gerçeklik (VR) oyun sistemi olan 'Oculus Rift' cihazının kullanımının uygulanabilirliğinin analizi	1-Bulanık Mantık, 2-Veri Madenciligi	Rehabilitasyon Süreçlerinde SG Teknolojisinin Kullanımı	SG temelli rehabilitasyon sistemlerinin iyileşme süreçlerinde olumlu etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır.
5	Virtual Prototyping Technologies Enabling Resource-Efficient and Human-Centered Product Development	2018	Allmacher C, Dudczig M, Klimant P, Putz M.	Sanal gerçeklik tabanlı prototipler kullanılarak kullanıcıyı takip eden ve onunla etkileşime giren iç lojistik amaçlı bir otomatik yönlendirmeli araç geliştirme	Bulanık Kontrol	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Sanal prototiplerin ürün geliştirme süreçlerinde zaman ve maliyet olarak olumlu katkısı olduğunu söylemişlerdir.
6	Collaborative design of a telerehabilitation system enabling virtual second opinion based on fuzzy logic	2018	Capecchi M, Ciabattone L, Ferracuti F, Monteriu A, Romeo L, Verdini F.	Bulanık Mantığa Dayalı Tele-Rehabilitasyon Sistemi Tasarımı	Takagi-Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi	Rehabilitasyon Süreçlerinde SG Teknolojisinin Kullanımı	Katılımcıların %85'i sistemin faydalı olduğunu, %95'i evde rehabilitasyon aşamasında ve fiziksel durumlarını iyileştirmede de faydalı olduğunu söylemiştir.
7	The Effect of Learning-Based Adaptivity on Students' Performance in 3D-Virtual Learning Environments	2018	Alam A, Ullah S, Ali N.	Çalışmada SG temelli eğitim ortamlarının, öğrenme üzerindeki etkisinin, öğrenme karar fonksiyonu aracılığıyla ölçülmesi ve bulanık mantık kullanılarak değerlendirilmesi	Bulanık Mantık	SG Temelli Eğitimler	G1 grubundaki öğrencilerin %74'ü, G2 grubundaki öğrencilerin % 37'si önerilen sistemdeki eğitimle geleneksel sistemdeki notlarına kıyasla daha fazla puan almıştır.

8	Personalization of Learning Activities within a Virtual Environment for Training Based on Fuzzy Logic Theory	2017	Mohamed, F, Abdeslam J, Lahcen, EB.	Sanal eğitim ve öğrenme süreçlerinde bulanık mantık ilkelerinden yararlanılarak öğrenen profili oluşturmak ve her öğrenene kendi profiline göre uygun öğrenme etkinlikleri sunmak.	Bulanık Mantık	SG Temelli Eğitimler	Öğrenme süresi, cinsiyet, zorluk seviyesi, istenilen dil, mevcut bilgi düzeyi, yaş gibi tanımlama öğeleri kullanarak bir sistem tasarımı yapmışlardır
9	Auto-adaptative Robot-aided Therapy based in 3D Virtual Tasks controlled by a Supervised and Dynamic Neuro-Fuzzy	2015	Lledo LD, Bertomeu D, Badesa FJ, Morales R, Sabater JM, Garcia-Aracil N.	Felçli hastalar için Bulanık Mantığa Dayalı Robot Destekli Terapi Sistem Tasarımı	1- ART Sinir ağı mimarisi 2- Nöro-bulanık Çıkarım Sistemi	Rehabilitasyon Süreçlerinde SG Teknolojisinin Kullanımı	Önerilen uygulama hastanın ihtiyaçlarına göre fizyolojik reaksiyonlarını sınıflandırırken, %92,38 oranında başarılı sonuç vermiştir.
10	Virtual Reality Simulation of Fuzzy-Logic Control during	2015	Thekkedan MD, Chin CS, Woo, W.	Bulanık Mantığa Dayalı Su Altı Araçların Konumlandırma Simülasyonu	Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Bulanık Kontrole dayalı denetleyicinin, geleneksel denetleyicilerden üstün yönleri bulunmuştur.
11	Employing Type-2 Fuzzy Logic Systems in the Efforts to Realize Ambient Intelligent Environments	2015	Hagras, H, Alghazzawi, D, Aldabbagh, G.	Akıllı ortamların bulanık mantıkla denetimi	Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi	SG Ortam Tasarımı	Sonuçlar, akıllı ortamların bulanık mantıklı kontrol süreçlerinin faydalı olduğunu göstermektedir.
12	Modeling and simulation of overtaking behavior involving environment	2014	Yu Y, El Kamel A, Gong G.	Yol geometrisi ve rüzgâr gibi çevresel bilgileri içeren SG trafik simülasyon sisteminde sollama davranışının modellenmesi ve simülasyonu	Bulanık kontrol	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Sonuçlar, bu makalede tasarlanan sollama davranışı modelinin uygun ve makul olduğunu göstermektedir.
13	Can artificial intelligence and fuzzy logic be integrated into virtual reality applications in mining?	2014	Mitra R, Saydam S.	Bulanık Mantık Tabanlı Sanal Ortam (AVIE) Tasarımı	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Bulanık kontrol süreçlerinin sanal ortam entegrasyonunun faydalı olduğunu söylemişlerdir.
14	A study of detecting and combating cybersickness with fuzzy control for the elderly within 3D virtual stores	2014	Liu CL.	SG Ortamındaki Değişkenlerin SG Hastalığı Üzerindeki Etkisi	Bulanık Mantık	Sanal Gerçeklik Hastalığı	SG ortamlarında; sahne açısı, dönüş Hızı ve maruziyet süresi arttıkça SG hastalığı görülme sıklığı artmaktadır.
15	A Quality of Experience Model for Haptic Virtual Environments	2014	Hamam A, El Saddik A, Alja'Am J.	Bulanık Mantığa Dayalı SG Deneyim Kalitesi Tasarımı	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	SG ortamlarındaki dokunsal deneyim kalitesi gerçek hayat deneyimi ile yakın sonuçlar göstermiştir ( $p<0.05$ ).
16	Embedding Mixed-Reality Laboratories into E-Learning Systems for	2013	Al-Tikriti MN, Al-Aubidy KM	Karma Gerçeklik Laboratuvarlarının Mühendislik Eğitimi için E-Öğrenim Sistemlerine entegre edilmesi	Bulanık Mantık	SG Temelli Eğitimler	Önerilen Sistemin, yükseköğretim kurumlarında faydalı bir model olacağı sonucuna varılmıştır.

	Engineering Education						
17	Modelling and Simulating of Risk Behaviours in Virtual Environments Based on Multi-Agent and Fuzzy Logic	2013	Cai LQ, Yang Z, Yang SX, Qu HC.	Bulanık Mantığa Dayalı Sanal Ortamlarda Risk Davranışı Simülasyonu	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Sonuçlar, önerilen modellerin sanal kömür madeni ortamlarında daha gerçekçi davranışlar oluşturabileceğini, bunun da madencilerin risk farkındalığını geliştirebileceğini göstermektedir.
18	An approach to optimise an avatar trajectory in a virtual workplace	2011	Shahrokhi M, Bernard A, Fadel G.	Bulanık Mantığa Dayalı Optimal Operatör Yürüme Yörüngesinin Tespiti	Bulanık Mantık	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Dinamik programlama kullanılarak, tehlikeli bir işyerinde bir operatör için en uygun yörüngeyi belirleyen bir yaklaşım geliştirilmiştir.
10	The Virtual Marathon: Parallel Computing Supports Crowd Simulations	2009	Yılmaz E, İşler V, Çetin YY.	Sanal modelleme Maraton	Mandami Bulanık Çıkarım Sistemi	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Gerçeğe yakın yarışmacı ve seyirci içeren sanal maratonun modellenmesine olanak sağlamıştır.
20	A neuro-fuzzy warning system for combating cybersickness in the elderly caused by the virtual environment on a TFT-LCD	2009	Liu CL	Sanal ortamın neden olduğu SG hastalığı ile mücadelede yönelik nöro-bulanık uyarı sistemi	Bulanık Mantık	Sanal Gerçeklik Hastalığı	Deneysel sonuçlara göre, maruz kalma süresi ve navigasyon dönüş hızının siber hastalık üzerindeki etkileri anlamlıdır.
21	Vehicle Simulation System: Controls and Virtual-reality-based Dynamics Simulation	2008	Kljuno E, Williams RL, Robert L.	Bulanık Mantığa Dayalı Araç Simülasyon Sistemi Tasarımı	Bulanık Mantık	SG Tabanlı Araç/ Robot Tasarımı	Bulanık çıkarım ilkeleri ile sürücüler için araç simülasyon robotu tasarlanmıştır.
22	A finite element method (FEM)-Fuzzy logic (Soft Computing)-virtual reality model approach in a coalface longwall mining simulation	2008	Torano J, Diego I, Menendez M, Gent M.	Kömür Madenciligi Tesisinin Davranışının Modellenmesi	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Önerilen model, kömür madenciligi ve kazı makinelerinin çalışma parametrelerinin yanı sıra doğrudan ölçülmesi veya gözlemlenmesi imkânsız olan parametrelerin de etkileşimli bir şekilde grafiksel temsiline olanak tanımaktadır.
23	The Red and Black Semantics: A Fuzzy Language	2007	Mura	Kavramsal dili yeni sanal ortamın yaratılmasında uygulamaya çalışmak	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Sonuçlar, önerilen kavramsal dilin SG ile uyumlu olduğunu söylemektedir.
24	Fuzzy approach to the intelligent management of virtual spaces	2006	Martinez JI, Skarmeta AFG, Gimeno JB.	Mevcut sanal ortamların akıllı sistemler yaklaşımıyla iyileştirilmesine yönelik yürütülen araştırmaları sunmak	Bulanık Mantık	SG Ortam Tasarımı/ Modelleme	Çalışmanın sonuçları, önerilen mimarinin hedefleri bulma konusunda daha güçlü ve sezgisel olduğunu göstermektedir.



25	Applying Fuzzy Logic for Learner Modeling and Decision Support in Online Learning Systems	2005	Al-Aubidy KM.	Bulanık Kontrol ilkeleri ile SG tabanlı eğitim /çevrimiçi eğitim modülü tasarlamak	Bulanık Mantık	SG Temelli Eğitimler	Sonuçlar, böyle bir sistemin sürekli öğrenme açısından hem öğrenciler hem de mezunlar için etkili olduğunu göstermektedir.
26	A fuzzy controller with supervised learning assisted reinforcement learning algorithm for obstacle avoidance	2003	Ye C, Yung NH, Wang D.	Engellerden kaçınmak için karma öğrenme algoritmasına sahip bulanık denetleyici tabanlı mobil robot modelleme	Bulanık Denetleyici	SG Ortam veya Araç Geliştirme	Simülasyon sonuçları önerilen yöntemin mevcut yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

### 3. Bulgular

Wang, Chardonnet, Merienne ve Ovtcharova (2021) çalışmalarında bireysel farklılıkların, kullanıcılarda siber hastalık görülmesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma 227 Avrupalı, 82 Asyalı birey ile yapılmıştır. Üç bireysel farklılığa (yaş, oyun deneyimi ve etnik köken) dayalı olarak sanal ortamdan kaynaklanan siber hastalığa duyarlılığı tahmin etmek için bulanık çıkarım sistemi ve uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi dahil olmak üzere bulanık modeller geliştirmeye çalışmışlardır. Bireylerin hastalığa yatkınlığının bulunmasında uyarlanabilir nöro-bulanık çıkarım sistemi sonuçlarının, bulanık çıkarım sistemi sonuçlarından daha iyi olduğunu söylemişlerdir.

Wang vd. (2021) siber hastalığın 2-12 yaş arası çocuklarda arttığını, yaşlıların siber hastalığa daha az eğimli olduğunu bulmuşlardır. Yine oyun ve teknoloji konusunda deneyimli kişiler sanal hastalığa daha dirençli bulunmuştur. Etnik köken bakımından ise, Asyalı bireylerin Avrupalı bireylere göre sanal hastalığa daha eğilimli olduğunu bulmuşlardır.

Sun, Kiselev, Liao, Stoyanov ve Loutfi (2020) çalışmalarında karma gerçeklik tabanlı bir teleoperasyon sistemi geliştirmişlerdir. Baş ve el hareketi takibi ile bir başa takılı ekran (HMD) tabanlı arayüz oluşturmuşlardır. Karma gerçeklik arayüzünün içinde, robotu uzaktan çalıştırmak için doğal insan-çevre etkileşimlerine olanak tanıyan bir etkileşim ağı tasarlamışlardır. SG sistemleri kullanılarak robotun hız ve hareket kabiliyeti parametrelerini incelemişlerdir. Önerdikleri sistemde, kaba hareket modu (CMM) ve hassas hareket modu (FMM) olarak iki hareket modu bulunmaktadır. Önerdikleri karma gerçeklik tabanlı uzaktan kontrol sisteminde; başarı oranı (15/16), geleneksel sistemden (4/16) daha iyi bulunmuştur. Yine sistemin manevra kabiliyetini geliştirmek amacıyla robotun yönünü, konumunu, hızını ve kuvvetini düzenlemek için bir dizi bulanık tabanlı algoritma kullanmışlardır.

Zhang vd. (2019) çalışmalarında analitik hiyerarşi süreci ve bulanık mantık teknolojisi ile SG maden güvenliği eğitim sisteminin kapsamlı bir değerlendirmesini sunmaktadır. Çalışmada SG teknolojisine dayalı maden güvenliği eğitiminin değerlendirilmesinde bulanık yaklaşım ve analitik hiyerarşi sürecini kullanmışlardır. Deney sürecinde; iki farklı SG ortamı tasarlamışlardır. İlk sistemde cep telefonu tabanlı SG gözlüğü, ikinci sistemde daha gelişmiş SG gözlüğü kullanılmıştır. Her iki sistemde de aynı eğitim içeriği kullanılmıştır. Verilerin değerlendirilmesinde, SG teknolojisi, giriş/çıkış cihazları, yazılım, kullanıcı özellikleri, görev ana göstergelerini kullanmışlardır. Analitik hiyerarşik süreç ve bulanık değerlendirme sonucunda; beş gösterge, SG teknolojisi – Mükemmel, Giriş/Çıkış cihazları – iyi, Yazılım – orta, Görev – iyi, Kullanıcı – mükemmel olarak bulunmuştur. Bu göstergelerin değerlendirme sürecindeki etkisine yönelik ağırlıkları; yazılım (%49,62), giriş/çıkış cihazları (%26,77), Görev (%12,42), Kullanıcı özellikleri (%7,13) SG teknolojisi (%4,07) olarak bulunmuştur. Maksimum üyelik ilkesine göre mevcut sistem üçüncü seviyeye (Orta) ait bulunmuştur. Beş bileşenin ayrı ayrı değerlendirilmesinde mevcut sistem ikinci seviyeye (mükemmel) ait bulunmuştur. Tüm sistemin nihai değerlendirme sonucu ise orta düzeydedir.

Qidwai, Ajimsha ve Shakir (2019) çalışmalarında yüz felcinin rehabilite süreçlerinde SG teknolojisinin etkisini incelemişlerdir. Yüz felci geçirmiş tek bir birey ile test edici bir düzen içerisinde beyaz topları rastgele fırlatan bir sanal oyun ile 10 günlük bir uygulama yapmışlardır. Katılımcının beyin elektriksel aktivite bulguları (Elektroensefalogram) ve kas elektriksel aktivite bulguları (Elektromiyografi) ölçülmüştür. Elektroensefalogram

(EEG) ve Elektromiyografi (EMG) verileri bulanık kontrol yöntemleri ile analiz edilmiştir. Katılımcının ilk ve son test sonuçları karşılaştırıldığında; EMG sinyallerinde ortalama %65'lik bir artış gözlemlenmiştir. EEG desenleri için, yüz ifadelerini kontrol eden kontralateral alanda olumlu değişimler izlenmiştir.

Allmacher, Dudczig, Klimant ve Putz (2018) çalışmalarında sanal gerçeklik tabanlı prototipler kullanılarak kullanıcıyı takip eden ve onunla etkileşime giren iç lojistik amaçlı bir otomatik yönlendirmeli araç geliştirmişlerdir. Geliştirilen araç; yönlendirme, engellerden kaçınma, yol izleme gibi fonksiyonlar için bulanık mantık denetleyicisini kullanmaktadır. Sanal gerçeklik uygulamaları ile araç tasarımı, ön proje aşamalarında daha fazla parametrenin ve kombinasyonlarının değerlendirilmesine olanak tanır.

Capecci, Ciabattini, Ferracuti, Monteriù, Romeo ve Verdini (2018) çalışmalarında kamera ve web tabanlı bir platformdan oluşan düşük maliyetli bir tele-rehabilitasyon sistemi kurmayı amaçlamışlardır. Sistem; bir fizyoterapistin varlığı olmadan, evde kabul edilebilir ve kullanılabilir uzaktan rehabilitasyon hizmetleri sağlayarak hasta hareketini izlemeye ve değerlendirmeye olanak sağlayacaktır. Çalışmaya 4 fizyoterapist, 20 bel ağrısı çeken deney grubu, 20 sağlıklı birey katılım sağlamıştır. Katılımcılarda 5 egzersizi 5 tekrar şeklinde yapmaları istenmiş ve puanlar kaydedilmiştir. Sistemi değerlendirmek için ise Takagi Sugeno bulanık çıkarım sistemini (FIS) önermişlerdir. Önerilen sistemde, fizyoterapist kriterleri tarafından belirlenen puanları sağlayarak denek performanslarını otomatik olarak değerlendirilmektedir. Uygulama sonuçlarında gerçek ve sanal fizyoterapist çıktıları birbirine çok yakın, bazen de aynı bulunmuştur. Katılımcıların %85'i sistemin faydalı olduğunu, %95'i evde rehabilitasyon aşamasında ve fiziksel durumlarını iyileştirmede de faydalı olduğunu söylemiştir. Sistemin kullanım kolaylığı orta düzeyde (%60) olarak algılanmıştır. Katılımcıların %65'i sistemi zor bulmuş olsa da sistemin zevkli ve eğlenceli olarak algılama oranı %100'dür.

Alam, Ullah ve Ali (2018) SG teknolojisi tabanlı eğitimlerin performansını incelemişlerdir. Çalışmada; SG temelli eğitimlerde, öğrenme becerisini bulanık mantık tabanlı bir yaklaşımla ölçmüşlerdir. 10. Sınıf düzeyinde 70 kız ve erkek öğrenci ile yürütülen çalışma da öğrencilerin hata sayıları ve test puanları sistemin girdilerini oluşturmaktadır. Başarı seviyesine G1 (başarı seviyesi: 80 ve üzeri) ve G2 (başarı seviyesi: 80 altı) olarak iki gruba ayrılan öğrencilere; geleneksel yöntem ve SG tabanlı yöntemle eğitim verilerek başarı durumlarındaki değişim izlenmiştir. G1 grubundaki öğrencilerin %74'ü, G2 grubundaki öğrencilerin % 37'si önerilen sistemdeki eğitimle geleneksel sistemdeki notlarına kıyasla daha fazla puan almıştır.

Mohamed, Abdeslam ve Lahcen (2017) bulanık kontrol yöntemini kullanarak kişiye göre kişiselleştirilebilen bir sanal eğitim modülü sistemini önermişlerdir. Öğrenme süresi, cinsiyet, zorluk seviyesi, istenilen dil, mevcut bilgi düzeyi, yaş gibi tanımlama öğeleri kullanarak bir sistem tasarımı yapmışlardır. Önerdikleri sistemde; bu öğelerde uygun seçimler yapıldığında sistem kişiyi otomatik olarak ilgili seviyedeki eğitim modülüne yönlendirmektedir.

LLedo, Bertomeu, Badesa, Morales, Sabater ve Garcia-Aracil (2015)'in çalışmalarında; robot destekli rehabilitasyon süreçlerinin, dinamik olarak hasta ihtiyaçlarına göre uyarlanması amacıyla fizyolojik reaksiyonların sınıflandırılması için ART (uyarlanabilir rezonans teorisi) sinir ağı mimarisi ve bulanık küme teorisini temel alınarak oluşturulan bir sınıflandırma yöntemi ile oluşturulan bir uygulama yapmışlardır. Önerilen uygulama hastanın ihtiyaçlarına göre fizyolojik reaksiyonlarını sınıflandırırken, %92,38 oranında başarılı sonuç vermiştir.

Thekkedan, Chin ve Woo (2015) çalışmalarında uzaktan çalıştırılan bir su altı aracının simülasyonu ve bulanık mantık kontrolü için grafik kullanıcı ara yüzü yazılımı önermektedir. Su altı araçlarının kontrol süreçleri belirsizlikler içermektedir. Ayrıca su akıntısı gibi dış etkenlerde bu belirsizliği arttırmaktadır. Bu bağlamda; SG teknolojisi farklı koşullara göre modelleme yapma imkânı sağlamaktadır. Çalışmada; önerilen bulanık kontrole dayalı tasarımın geleneksel kontrol yöntemlerinden üstün yönleri bulunmuştur.

Hagras, Alghazzawi ve Aldabbagh (2015) çalışmalarında, bulanık kontrolü akıllı ortam süreçlerine entegre etmişlerdir. Akıllı ortamda karşılaşılan sensör etkileşimlerini etkileyen çevresel gürültü, çevresel faktörlerin kısa ve uzun vadelerdeki değişimleri ve sensörlerdeki aşınma ve yıpranma gibi belirsiz durumların denetiminde bulanık mantığın kullanılmasını önermişlerdir. Birden fazla kullanıcı tarafından kullanılan akıllı ortam alanlarındaki görsel bağlam bilgilerini otomatik olarak algılayabilen, özetleyebilen ve bunlar arasında kolayca arama yapabilen bir bulanık sistem geliştirmişlerdir.

Yu, El Kamel ve Gong (2014) çalışmalarında; yol geometrisi ve rüzgâr etkisini dikkate alarak akıllı araç sollama davranışı modeli oluşturmuşlardır. Çoklu denetleyici tabanlı akıllı aracın geliştirilmesinde merkezi olmayan bir tasarım paradigması kullanılmış, bu sayede sollama davranışı çoklu denetleyicinin koordinasyonu ile gerçekleştirilmiş, yol ve rüzgârı içeren araç dinamiği modelleri analiz edilmiştir. Şerit değiştirme davranışı modeli ve araba takip modeli de analiz edilmiştir. Sollama davranışının simülasyonunu gerçekleştirmek için sanal

gerçeklik trafik simülasyon sistemi tasarlanmış ve gerçekçi yol geometrisi özellikleri sağlamak için coğrafi bilgi sistemleri kullanılmıştır. Sanal gerçeklik trafik simülasyon sistemi ile sollama davranışı modeli doğrulanıp analiz edilebilmektedir. Sonuçlar, bu makalede tasarlanan sollama davranışı modelinin uygun ve makul olduğunu göstermektedir.

Mitra ve Saydam (2014) bulanık mantık ve yapay zekanın SG teknolojisine entegrasyonunu içeren bir çalışma yürütmüşlerdir. Maden Mühendisliği eğitiminde kullanılan bir simülatöre, bulanık mantık kontrol süreçlerinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır.

Liu (2014) 3 boyutlu bir sanal mağaza kullanarak, yaşlı bireylerin SG hastalığı semptomlarına neden olan faktörleri araştırmıştır. Bu bağlamda, sahne dönüş hızı ve maruziyet süresinin SG hastalığındaki etkisini araştırmıştır. Ölçme aracı olarak simülatör hastalık anketi (SSQ) kullanılmıştır. Çalışmada; SG maruziyetinden önceki ve sonraki puanlar arasında anlamlı bir fark bulunmuştur ( $t(31)=12.705, p=.000$ ). 16 semptom (Bulanık, yorgunluk, odaklanma güçlüğü vb.) için maruziyet sonrası SSQ puanlarının, deneklerin yüzde 50'sinden fazlasında artış gösterdiğini bulmuştur. SG hastalığının görülme sıklığının maruz kalma süresi ve sahne dönüş hızı ile orantılı olarak arttığını bulmuştur.

Hamam, El Saddik ve Alja'Am (2014) çalışmalarında; dokunsal sanal ortamların kullanıcı deneyim kalitesini niceliksel olarak ölçmek için bulanık mantık çıkarım sistemini (FIS) kullanmışlardır. Dokunsal cihazlar kullanarak bir tahta üzerindeki sanal topun dengesini korumak için iki kullanıcının iş birliğini içeren bir oyunla uygulama yapmışlardır. Uygulamaya 30 mühendislik öğrencisi (12 kadın-18 erkek) katılım sağlamıştır. Skor, görevin tamamlanma süresinden ve topun tahtanın ortasından itibaren pozisyonundaki değişikliklerden oluşmaktadır. Sonuçlar, önerilen bulanık modelin, kullanıcının uygulama kalitesine ilişkin tahminini düşük hatayla önemli ölçüde yansıttığını ve dolayısıyla kullanıcı deneyim kalitesi değerlendirmesi için uygun olduğunu göstermektedir. Bulanık sistem değerleri, gerçek kullanıcı değerlerine (%4,6) makul bir hata değeri dahilinde yakın bulunmuştur. İki değer arasındaki korelasyon anlamlı bulunmuştur ( $p < 0,01$ ).

Al-Tikriti ve Al-Aubidy (2013) çalışmalarında; SG ortamında oluşturulmuş bir laboratuvarın eğitim etkinliği üzerindeki etkisini araştırmıştır. Simüle laboratuvarlar öğrencilere hedefleri, teknoloji kurulumunu, prosedürleri anlamak ve elde edilen sonuçları tartışmak için simüle edilmiş bileşenlerle ilgilenme şansı sunmaktadır. Sistem, gerçek zamanlı modda, otomatik performans değerlendirici ve geri bildirim aracı olarak kullanılabileceği de sunmaktadır.

Cai, Yang, Yang ve Qu (2013) çalışmalarında; maden işçilerinin risk davranışlarını ortaya çıkarmak için, yeraltı madencilerinin potansiyel tehlikeli olaylara tepki verme davranışlarını simüle etmek amacıyla bilişsel değerlendirme teorileri ve bulanık mantık tekniklerine dayanan bulanık bir duygusal davranış modeli önermişlerdir. Deneysel sonuçlar, önerilen modellerin sanal kömür madeni ortamlarında daha gerçekçi ve makul davranışlar oluşturabileceğini, bunun da madencilerin risk farkındalığını geliştirebileceğini ve madencilerin beklenmedik yer altı durumlarıyla karşı karşıya kaldıklarında acil karar verme becerilerini daha da geliştirebileceğini göstermektedir.

Shahrokhi, Bernard ve Fadel (2011) çalışmalarında; dinamik programlama ve bulanık mantık ilkelerini kullanarak, tehlikeli bir işyerinde bir operatör için en uygun yörüngeyi belirleyen için bir model geliştirmişlerdir. İşyeri alanı kare hücrelere ayrılmıştır ve operatörün yörüngesi, sıralı hücre merkezlerini birleştiren çokgenlerle yaklaştırılmıştır. Tehlikeler ve bariyerlerin etkisi bulanık alanlar kullanılarak modellenmiştir. Yörüngeler için risk-maliyet endeksleri; yer değiştirme uzunluğu ve operatör yolu ile bulanık tehlike bölgelerinin kesişimi tarafından sağlanan alan dikkate alınarak hesaplanmıştır. Karmaşık yörüngelerin tepki alanını geliştirmek için geriye dönük bir kontrol yöntemi kullanılmıştır. Önerilen model, tehlike bölgelerinin bilgisayarlı 3D platformlarda gösterildiği 2D yörüngeleri haritalamak için kullanılabilir. 2D yörüngeleri haritalamak için kullanılabilir.

Yılmaz, İslar ve Çetin (2009) bulanık mantığa dayalı bir maraton koşusu simülasyonu yapmışlardır. Bulanık mantık yarışçıların ve seyircilerin hareketlerini gerçeğe en yakın hale getirmeye olanak sağlar. Seyirciler kenarda bekleyip tezahürat yapabilmekte, yarışçılar ise hızlarını arttırıp azaltabilmektedir.

Liu (2009) yaşlılarda farklı navigasyon dönüş hızlarında, sahnenin eğim açıları ve maruz kalma süresinde bir SG deneyimi sırasında ve sonrasında artan SG hastalık düzeylerine neden olan etkileri araştırdığı çalışmada; bu hastalığa neden olan etkenleri belirleyerek, SG hastalığı ile mücadele için nöro-bulanık algoritmali bir uyarı sisteminin tasarlanması yönünde model geliştirmeyi hedeflemiştir. 66-73 yaş arasındaki 40 katılımcı ile yürütülen çalışmada 4 seviyeli eğim açısı, maruz kalma süresi ve dönüş hızı ile uygulama yapılmıştır. Maruziyet öncesi 2, 8050 olan SG hastalığı testi sonuçları, maruziyet sonrası 28,2588 olarak ölçülmüştür. Ölçümlerde simülatör

hastalık anketi kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara göre, maruz kalma süresi ve navigasyon dönüş hızının siber hastalık üzerindeki etkileri anlamlıdır.

Kljuno, Williams ve Robert (2009) çalışmalarında; pilot ve sürücü eğitimi için tasarlanan bir araç simülasyon sistemi modeli önermişlerdir. Çalışmada, SG ve bir hareket platformu kullanarak araç hareketinin gerçekçi simülasyonlarını sağlayacak bir sistem yapmayı amaçlamışlardır. Simülasyon robotunun dinamik kısıtlamalarının ayrıntılı bir açıklamasını, sayısal bir çözümle birlikte sunmuşlardır. Robot hareketi, bir bulanık mantık denetleyicisi ile kademeli kontrol şeklinde dört kontrol sistemi aracılığıyla sağlanmaktadır. Sistem dokuz bilinmeyen kablo gerilimi ve altı dinamik denklem ile kısıtlı olduğundan, bir optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Kontrol karmaşıklığı, kablolu robotlara özgü pozitif kablo gerilimlerinin korunması gerekliliği ile artmaktadır. Sistem simülasyonları bir sanal gerçeklik ortamı kullanılarak yapılmıştır.

Torano, Diego, Menendez ve Gent (2008) çalışmalarında; kömür madenciliği tesisinin davranışını bulanık tabanlı yaklaşımla modellemişlerdir. Madencilik operasyonları, işlerin doğası gereği belirsizlikler içermektedir. Önerilen yöntem tesisin öngörülebilir performansını tahmin edebildiğinden, gelecekteki kömür panellerinin kullanımını planlamak için kullanışlı bir araç sağlamaktadır.

Mura (2007) literatürdeki çalışmalardan farklı olarak; SG ortam dili alanında çalışmıştır. Sanat ve teknoloji arasındaki boşluğa, kırmızı ve siyah anlamsal kodlamayı kullanan bulanık mantık yaklaşımını entegre etmiştir. Bu meta-dili sanal bir sanat eseri deneyine uygulamıştır. Bu çalışmada geliştirilen bulanık tabanlı SG modeli tüm etkileşim süreçlerinde 'diyalog sitemi' olarak kullanılabilir. Bu çalışmada geliştirilen bulanık tabanlı SG modeli tüm etkileşim süreçlerinde 'diyalog sitemi' olarak kullanılabilir.

Martinez, Skarmeta ve Gimeno (2006) kullanıcıların sanal ortamlarda sorgulama yapmasına olanak tanıyan bulanık mantık tabanlı bir uygulama tasarlamışlardır. Bu arayüz, kullanıcıların hem bulanık sorgu çözücüyü hem de anahtar kelime sorgu çözücüyü kullanarak sanal dünyaları sorgulamasına olanak tanımaktadır. Önerilen bulanık sorgulayıcı 29 katılımcının katılımı ile değerlendirilmiştir. Katılımcılara önce bulmaları gereken bir hedef (3 boyutlu sahne) gösterilmiş, daha sonra belirli bir arama yöntemi (gezinme, anahtar kelime sorgulama, bulanık sorgu) kullanarak bu sahneyi sanal ortamda bulmaları istenmiştir. Katılımcılar bulanık sorgu çözücüyü daha doğal ve kolay bulmuşlardır ( $z=4,391$ ,  $P<0,001$ ). Bulanık sorgu çözücü ile sanal ortamda bulunmak istenen nesneyi bulmak için harcanan süre oldukça kısalmıştır.

Al-Aubidy (2005) çevrimiçi bir eğitim modülünün tasarımında bulanık küme teorisini kullanmıştır. Sistem, öğrencinin bilgi düzeyine göre uygun öğretim materyallerini sunabilmektedir. Önerilen sistemin etkinliği, öğrenciler ve mezunlar tarafından anket yolu ile değerlendirilmiştir. Anket sonuçları, böyle bir sistemin sürekli öğrenme açısından hem öğrenciler hem de mezunlar için etkili olduğunu göstermektedir.

Ye, Yung ve Wang (2003) çalışmasında bulanık denetleyici kullanarak, engellerden kaçınma görevi için karma öğrenme destekli bir mobil robot geliştirmişlerdir. Pekiştirmeli ve denetimli öğrenme metotları kullanılarak, bulanık denetleyici tabanlı bir robot tasarlamışlardır. Robot öğrenme eylemi sonrasında engelle geldiğinde kaçınmayı öğrenmiştir. Uygulama alanının dar olması öğrenme sürecindeki engellerden biri olarak bulunmuştur. Simülasyon sonuçları önerilen yöntemin mevcut yöntemlerden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

#### 4. Tartışma

Bu makale SG uygulamalarında bulanık mantığın kullanılmasının sistematik derlemesine odaklanmaktadır. Bulanık mantığa dayalı modelleme ve karar verme, problemlerle başa çıkmada etkili çözümler sunabilmektedir. SG teknolojisinin geliştirilmesinde, bulanık mantık yöntemi olumlu sonuçlar vermektedir. Bulanık mantık temelli SG çalışmalarının daha çok sanal ortam modelleme ve sanal araç geliştirme konularında yoğunlaştığı görülmektedir (Sun vd. 2020; Allmacher vd. 2018; Thekkedan vd. 2015; Hagraş vd. 2015; Shahrokhi vd. 2011).

SG teknolojisi ürün, ortam, araç geliştirme süreçlerinde zaman ve kaynak tasarrufu sağlamaktadır. SG temelli prototipler erken proje aşamalarında geliştirme süresinin kısaltılması, ürün ve süreç davranışının daha hızlı simüle edilmesi ve fiziksel prototiplerin azaltılması sağlamaktadır. Allmacher vd (2018) çalışmasında sanal gerçeklik teknolojilerine dayalı sanal prototiplerin önemini vurgulamaktadır. SG temelli prototiplerde bulanık mantık yaklaşımının entegre edilmesi, bulanık çıkarımın kontrol süreçlerindeki başarısı yönüyle kıymetlidir. Bulanık mantık temelli SG ortam/araç geliştirme çalışmaları; uzaktan kontrol sistemi tasarımı, bulanık kontrollü robot geliştirme gibi bulanık sanal prototiplerin geliştirilmesini içermektedir. Geliştirilen prototipler bulanık sistemin SG temelli prototiplerdeki başarısını ortaya koymaktadır. Sun vd. (2020) karma gerçeklik sistemine dayalı uzaktan kontrol sistemi tasarımı ile ilgili yaptıkları çalışmada; sistemin (15/16) geleneksel uzaktan kontrol sistemlerinden (4/16) daha başarılı bulunması bu hipotezi desteklemektedir. Geleneksel sistemi kullanan operatörlerin, uzaktan

kontrol sistemlerinde, robotun hem konumunu hem de yönünü aynı anda kontrol etmesi gerekmektedir. Bunun için operatörün hata riski çok az olmalı ve sistem büyük beceri istemektedir. Sun vd. (2020) geliştirilen sistemde operatörler, bulanık çıkarım yöntemleri ile robotun pozunu düzenlemek için kontrol modlarını değiştirebilir ve görevin durumunu kontrol etmek için kontrol döngüsünden serbestçe ayrılabilirler. Bu durum bulanık yaklaşıma dayanan SG prototiplerinin esnekliğine kanıt olarak gösterilebilir. Bulanık mantık; SG prototiplerinin geliştirilmesinin yanında, günlük hayatta kullanılan simülasyonların tasarım süreçlerine de entegre edilmektedir. Uçak, denizaltı vb. araçların sürüş simülasyonlarının tasarımında bulanık mantık sıklıkla kullanılmaktadır. KJuna vd. (2009), Thekkedan cd. (2015), Shahrokhi vd. (2011) çalışmalarında sürüş simülasyonlarına bulanık mantığı başarıyla entegre etmişlerdir. Bulanık Yöntem sürüş simülasyonlarında; sürücünün bir başlangıç noktasından bir hedef noktasına giderken, engeller ve tehlikeli nesnelere etrafında nasıl bir yörünge oluşturabileceğini gösterebilmektedir. Bulanık mantık SG sürüş simülasyonlarında, optimum sürüş yolunu bulmak için uyarlanabilir, bunun yanında, acil durum güvenlik prosedürlerini ve işyerindeki güvenliği değerlendirmek için kullanılabilir. Ayrıca farklı düzenleri ve konfigürasyonları değerlendirerek ve bariyerlerin insan güvenliği ve performansı üzerindeki etkisini ölçerek, tasarım aşamalarında üretim sistemlerinin düzenini ve konfigürasyonunu iyileştirmeye yardımcı olabilir. Yu vd. (2014)'de bulanık mantık denetleyicileri ile yol ve rüzgâr faktörlerini dikkate alarak insan davranışını taklit edecek bir sistem tasarlamışlardır. Model SG ile simüle edilerek incelenmiştir. Sollama davranışı tehlikeli ve karmaşık olduğu için gerçek hayatta test etmek zordur. Bu nedenle SG teknolojisi trafik ve sürüş simülasyonlarında giderek yaygınlaşmaktadır.

Sanal gerçeklik teknolojisi, bireylerin gerçek hayatta tehlikeli olabilecek ortamları deneyimlemelerini, güvenli ve kontrol edilebilir bir ortamda eğitim alabilmelerini sağlamaktadır. SG teknolojisi bu yönüyle olası kazaların ve zararların önlenmesi açısından çok önemlidir. Zhang vd. (2019) bu alanda çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; SG teknolojisinin çok tehlikeli iş yerlerinden biri olan madencilik sektöründe sanal gerçeklik tabanlı güvenlik eğitimlerinin etkinliğini araştırmışlardır. Değerlendirme yöntemi olarak; sanal gerçekliğe dayalı maden güvenliği eğitiminin gösterge sayısı ve göstergelerin değerlendirme sonuçlarının belirsizliğini dikkate alarak bulanık yaklaşımı kullanmışlardır. Bulanık kapsamlı analiz yöntemi, SG eğitimleri için kapsamlı bir değerlendirme sonucu sunabilse de sonuç, düşük ağırlıktaki herhangi bir göstergenin sistem üzerindeki etkisini tek başına yansıtamamaktadır. Örneğin bir eğitim sisteminde, düşük ağırlıklı bir göstergenin değerlendirme sonucu özellikle düşükse, sistemin genel değerlendirme sonucuna çok fazla etkisi olmayacaktır ancak özellikle düşük değerlendirme sonucu olan gösterge, deneyimi ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Cai vd. (2013)'de madencilik eğitim simülasyonlarında insan risk davranışının modellenmesi alanında çalışmıştır. Sanal ortamlarda insan davranışının modellenmesi ve simülasyonu en zorlu araştırma konularından biridir. Çalışmalarındaki eylem seçim modeli, sanal insanın inançlarını, arzularını, niyetlerini ve olayların yoğunluk düzeyini hesaba katmaktadır. Her iki çalışmanın sübjektif veri içermesi, sistemin gerçek sonuçları ile değerlendirmeye bağlı sonuçlar arasında sapmaya neden olabilmektedir. SG ortamlarının değerlendirme süreçlerinde kalp atış hızı, solunum, cilt statüsü, göz hareketi ve diğer birçok fizyolojik göstergenin kullanılmasının daha objektif sonuçlara ulaşılmasında faydalı olacağı düşünülmektedir.

Öğrenme-öğretme sürecinde ileri teknolojik sistemlerin uygulanması, güçlü ve yenilikçi bir eğitim paradigmasının geliştirilmesinin önünü açmaktadır. Al-Aubidy (2005)'de bulanık mantığın sanal eğitim ortamı tasarımında kullanımının etkinliğini araştırmıştır. Bulanık mantığın sanal eğitim tasarım süreçlerinde; bilgi edinme, temsil etme ve karar verme süreçlerindeki belirsizliklerle başa çıkabileceğini savunmuştur. Yine, öğrenci modelinin oluşturulmasında ve öğrenme düzeyine göre uygun öğretim materyalinin sağlanmasında bulanık mantık ilkeleri başarılı sonuçlar sunmaktadır. Al-Tikriti ve Al-Aubidy (2013) çalışmalarında benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Karma gerçeklik ortamları ile e-öğrenme modellerinin, yükseköğretim kurumlarında tercih edilen bir eğitim aracı olduğunu söylemişlerdir. Bu alandaki ilerici araştırma ve geliştirmeler, SG öğrenme araçlarının, sistem uygun materyal seviyesini ve öğrencinin tercih ettiği uygun hızı sağladığı için öğrenciler arasında popüler olduğunu kanıtladığını göstermektedir. Öğrenme ortamlarının yanında bir diğer konu bireylerin öğrenme süreçleridir. Bireylerin 'öğrenme becerisi' doğrudan ölçülmesi zor olan niteliksel bir değişkendir. Alam vd. (2018) bunun için öğrenme karar fonksiyonunu önermişlerdir. Önerilen çerçevede bir öğrencinin öğrenme yeteneği, öğrenme karar fonksiyonunu (LDF) aracılığıyla ölçülmekte ve bulanık mantık kullanılarak değerlendirilmektedir. Öğrencilerin performansına bağlı olarak sistem, zayıf, ortalama ve iyi öğrenciler için öğretim materyallerini kişiselleştirmektedir. Sistem; zayıf öğrencilere verilen kavramla ilgili detaylı bilgi vermektedir. Böylece öğrenciler öğrenme fırsatı veren öğrenme düzeyinde daha fazla kalmaktadır. Her bireyin öğrenme yeteneği, yaş, cinsiyet vb. gibi çeşitli faktörlere bağlı olabilir. Öğrenme aktivitelerinin kişiselleştirilmesi; her bireyin öğrenme yeteneğinin yaş, cinsiyet, eğitim süresi, kişisel tercihler, materyalin içeriği vb. gibi çeşitli faktörlere bağlı olup belirsizlik içeren bir konudur. Mohamed vd. (2017) bu belirsizlikleri bulanık mantık ile açıklamaya çalışmışlardır. Önerdikleri sistem ile kişinin bireysel özellikleri ve öğrenme tercihleri tanımlandığında, sistem; uygun eğitim seviyesini ve sanal içeriği belirlemektedir.

SG terapi ve rehabilitasyon süreçlerinin birçok alanında umut verici bir araç olarak kullanılmaktadır. Düşük maliyetli SG araçlarının ortaya çıkması, işlevsel ve erişilebilir SG sistemlerinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Qidwai vd. (2019)' de SG teknolojisini rehabilitasyona entegre eden bir araştırma yürütmüşlerdir. Çalışmalarında, yüz felci olan hastalarda duygusal ifadenin yönetimini geliştirmek için, rehabilitasyon hedeflerini hasta merkezli sonuçlarla ilişkilendiren daha geniş bir yaklaşım önermişlerdir. Bu çalışma ile SG temelli rehabilitasyon sistemlerinin iyileşme süreçlerinde olumlu etkisi olduğunu ortaya koymuşlardır. Capecci vd. (2018) de bulanık çıkarım sistemi kullanan sanal bir tele-rehabilitasyon sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada bireylerin evde, kabul edilebilir ve kullanılabilir bir uzaktan rehabilitasyon sistemi ile izlenmelerini ve değerlendirmelerini sağlamak amaçlanmıştır. Bu sayede; uygulamayı kullanan hastalara ve fizyoterapistlere tam zamanlı ve ücretsiz ikinci bir görüş sağlayan, her zaman erişilebilen sanal bir fizyoterapist imkânı sağlanmaktadır. Çalışma bulguları Qidwai vd. (2019)'nin bulgularını destekler niteliktedir. Katılımcıların büyük bir kısmı (%95) sistemin rehabilitasyon süreçlerine faydası olduğunu söylemiştir. LLedo vd. (2015) de bulanık mantığı, SG temelli rehabilitasyon sistemi tasarımında kullanmıştır. Önerdiği sistemle hasta ihtiyaçlarına göre uygun rehabilitasyon sürecinin ayarlanabildiği bir sistem önermişlerdir.

SG teknolojisinin rehabilitasyon süreçlerindeki başarısı, literatürdeki çalışmalarda sıkça ifade edilmiştir. Hasta ve dezavantajlı bireylere yönelik olan bu gelişmelerde bu teknolojinin fiziksel etkilerinin incelenmesi de elzemdir. SG uygulamaları kullanım esnasında, kişilerde sanal ortam-gerçek ortam uyumsuzluğu kaynaklı bazı semptomlar gelişebilmektedir. Allmacher vd (2018) sanal prototipleminin fiziksel prototiplemeye geçerli bir alternatif olsa da bazı dezavantajlara sahip olduğunu söylemişlerdir. Bazı kullanıcıların yorgunluk yaşayabildiğini, alışmak için daha fazla zamana ihtiyaç duyabildiğini ve hatta bazı rahatsızlıklar yaşayabildiklerini ifade etmişlerdir. Liu (2009) ve Liu (2014) çalışmalarında SG kullanımı esnasında ortaya çıkan bu semptomları araştırmıştır. Literatürde siber hastalık olarak adlandırılan bu durum henüz yeni bir konudur. Liu (2009;2014) çalışmasında, SG ortamlarına maruz kalma süresi ve navigasyon dönüş hızının siber hastalık üzerindeki etkisini anlamlı bulmuştur. Bu iki faktörün değerleri mekanik-elektronik bir sistem aracılığıyla tespit edilebildiği için objektif ölçüm değişkenleridir. Bu nedenle, siber hastalıkları azaltacak bir uyarı sistemi geliştirmek için kullanılmasının doğru sonuçlar vereceğini düşünülmüşlerdir. Wang vd. (2021) Bireysel faktörlerin sanal hastalık üzerindeki etkisine bakmak için bulanık yöntemi önermiş ve bireysel özellikler ile hastalık arasında korelasyon olduğunu bulmuştur. Çalışmada yalnızca 3 bireysel etken bazında hastalığa yakınlık araştırılmış, diğer bireysel özellikler bakımından kapsamın genişletilmesinin faydalı olacağını söylemişlerdir. Bunun yanında SG ortamlarının neden olduğu etkilerin değerlendirilmesinde ağırlıklı nitel yöntemler (simülasyon hastalık anketi) kullanılmaktadır. Fiziksel uyaranlarında değerlendirildiği çalışmaların yapılması SG teknolojisinin insan üzerindeki etkilerinin anlaşılmasında faydalı olacaktır.

## 5. Sonuç ve Öneriler

SG teknolojisi; müzeler, tarihi alanlar, kısıtlı binalar gibi kısıtlı erişim alanlarına veya tehlikeli durumlar nedeniyle gerçek hayatta çoğaltılması zor ortamlarda ve diğer örneklerde kullanıcıları konumlandırmak için güçlü bir araçtır. SG uygulamaları sektörlere özgü uygulamalarda karşılaşılan güç durumlarda baş etmede iyi çözümler sunmaktadır. Bu tür simülasyonlar, kullanıcıların kontrollü bir ortamda gerçek hayattaki durumları deneyimlemelerine izin vermek için kullanılabilir ve kullanıcının katılımı gibi ilginç olayların incelenmesini sağlar. Ayrıca, hata yapma endişesi olmayan ortamlar sunduğu için güçlü bir eğitim aracı olarak kullanılabilir.

Sanal ortam süreçlerinin kullanım amaçlarındaki geniş olanaklar sayesinde, sanal gerçekliğin kullanıldığı alanlar hızla artmaktadır. SG teknolojisinin yeni bir teknoloji oluşu ve hızla yayılması nedeniyle ile bir takım denetleme ve kontrol süreçlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bulanık Mantığın, denetim ve kontrol süreçlerindeki başarısı, araştırmacıların sanal gerçeklik uygulamalarında bulanık denetim konularına yoğunlaşmalarını sağlamıştır. SG teknolojisinin son yıllarda gelişen bir teknoloji olması nedeniyle teknolojinin kullanımında hala bazı belirsiz alanlar vardır. Bulanık mantığın, daha çok belirsizlik içeren kontrol ve karar verme süreçlerinde kullanılması nedeniyle, SG alanındaki çalışmalarda kullanımının arttığı görülmüştür. Yürütülen çalışmalar, bulanık mantık sistemleri gibi akıllı kontrol tekniklerinin, SG uygulamalarının kontrol süreçlerinde kullanımının uygun olduğunu göstermiştir.

Bulanık sistemler, bir karar verme süreci içerisinde birbiriyle ilişkili birden fazla faktörün katkılarının ağırlık faktörlerine göre kapsamlı bir şekilde ele alınması ve üyelik fonksiyonları kullanılarak bulanıklığın azaltılması ile güzel sonuçlar vermektedir. Bulanık yöntem; 'değerlendirme göstergeleri ve nesnelere derecelendirme seviyelerini oluşturmak, her değerlendirme faktörünün ağırlık faktörünü ve üyelik vektörünü belirledikten sonra bulanık değerlendirme matrisini hesaplamak ve bulanık değerlendirme matrisi ve faktörlerin ağırlık vektörü üzerinde bulanık aritmetik esas olarak nesne sınıfını belirlemek' aşamalarından oluşmaktadır (Öztürk & Paksoy, 2016:172). Son dönemlerde bulanık mantığın sayısal yöntemlerle birlikte kullanılması, bulanık mantığın

belirsizlik içeren kontrol ve karar verme süreçlerindeki başarısını arttırmıştır (Yılmaz, 2023). Bulanık mantığın belirsizlik içeren kontrol ve karar verme süreçlerindeki başarısı dikkate alındığında, SG alanında bulanık mantık temelli yöntemlerin kullanılması önemlidir.

Sağlık, eğitim, ürün geliştirme gibi birçok süreçte bulanık mantık denetiminin kullanılması yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada ‘bulanık mantık yaklaşımına dayanan sanal gerçeklik araştırmaları’ analiz edilerek mevcut durum belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde bulanık mantık yaklaşımına dayanan sanal gerçeklik alanındaki çalışmaların ‘kullanıcı deneyimi içeren sanal gerçeklik simülasyon ile ortam modelleme, sanal gerçeklik ürün veya araç geliştirme, sanal gerçeklik ortam dili modelleme, otonom robot kontrol tasarımı, sanal gerçeklik temelli eğitimler ve sanal gerçeklik hastalığı’ konularında yoğunlaştığı görülmektedir.

SG alanında yapılan araştırmalar çok geniş bir alana sahiptir. Bulanık mantık yaklaşımı çerçevesinde spesifik olarak incelenen bu alanda; bulanık mantığın sanal gerçeklik çalışmalarında daha çok ortam ve ürün geliştirme süreçlerindeki belirsiz durumlarda etkin bir süreç izlenmesi ve en iyi tasarımın yapılması için kullanıldığı görülmektedir (Cai vd. 2013; Hamam vd. 2014; Sun vd. 2020). Yapılan araştırmalarda; bulanık mantık temelli SG ürün ve ortam prototiplerinin daha esnek olduğu bulunmuştur.

Eğitim, sanal gerçeklik alanında bulanık mantığın kullanıldığı diğer bir alandır. Sanal eğitim ortamlarına yönelik çalışmalar çok yenidir. Sanal eğitimlerde bulanık mantık denetiminin kullanımı, literatüre sunacağı katkı bakımından çok önemlidir. Sanal gerçeklik teknolojisi görselleştirme ve duyulara hitap edebilme özellikleri ile eğitim yöntemlerine farklı bir bakış açısı getirmiştir. Eğitimde, artırılmış gerçeklik ve sanal gerçeklik gibi yenilikçi teknolojilerin kullanımı, geleneksel sınıf eğitimi ile gerçek dünya deneyimi arasındaki boşluğu doldurabileceği ve öğrencilerin mesleki gelişimi için somut faydalar sağlayabileceği görülmüştür (Al-Aubidy, 2005; Al-Tikriti vd. 2013; Mohamed, vd. 2017). Bulanık mantık yaklaşımı; sanal eğitim süreçlerinin tasarımı, sanal eğitim araçlarının değerlendirilmesi ve sanal eğitimin öğrenme üzerindeki etkisi gibi konularda yöntem olarak kullanılmaya başlanmıştır (Al-Aubidy, 2005; Al-Tikriti vd. 2013; Mohamed, vd. 2017). Ayrıca, mesleki eğitimlerde, zorlu çalışma koşullarının simüle edilebilmesinde, bulanık mantık yaklaşımından faydalanılmaktadır (Zhang vd. 2019).

Tıp, sağlık ve rehabilitasyon süreçleri SG teknolojisinin yoğun bir şekilde kullanıldığı diğer bir alandır. SG terapi ve rehabilitasyon süreçlerinin birçok alanında umut verici bir araç olarak kullanılmaktadır. Zorlu cerrahi işlemler öncesinde, sanal ameliyatlara ile deneyim kazanılabilmektedir. Tıp ve sağlık eğitimlerinde, SG uygulamalarından faydalanılmaktadır (Qidwai vd. 2019; Capecci vd. 2018). Bulanık mantık temelli SG araştırmalarında, bulanık çıkarım sistemi kullanan rehabilitasyon sistemlerinin başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca, bulanık mantık temelli sağlık hizmeti uygulamalarının evde tedavi süreçlerini iyileştirdiği ulaşılan diğer bir sonuçtur (Qidwai vd. 2019; Capecci vd. 2018; Lledo, 2015).

SG teknolojilerinin kullanıldığı alanlar değerlendirildiğinde, tüm bu süreçlerin ortak öznesi ‘insan’dır. Sanal uygulamaların birinci öznesinin insan oluşu, bu sanal ortamların insanlar üzerindeki etkisinin araştırılmasını gerekli kılmıştır. Literatürde sanal ortamın kişi üzerindeki etkilerini inceleyen çeşitli araştırmalar bulunmaktadır (Liu, 2009; Liu, 2014, Wang 2021). Bu çalışmalarda, sanal ortam deneyiminin bazı kullanıcılarda oluşturduğu olumsuz etkiler ifade edilmektedir. Bu olumsuz durumlar ‘sanal gerçeklik hastalığı, simülasyon hastalığı ve siber hastalık’ olarak belirtilmiştir. SG teknolojisinin insan üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde de bulanık çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Bulanık çıkarım yöntemi ile bu olumsuz durumun ortaya çıkma nedenleri ve kişiler üzerindeki etkileri saptanmaya çalışılmıştır. Eğitim süreçlerinde sanal ortamların kullanılmasının yaygınlaşması, hemen hemen her sektörde sanal ortam ve sanal araç kullanılmaya başlanması göz önüne alındığında; sanal ortamların insan üzerindeki etkilerine yönelik çalışmaların artırılması önem arz etmektedir. SG ortamlarının insan üzerindeki etkilerine ilişkin bulanık temelli çalışmalar oldukça kısıtlı olup, bu alanda araştırmaların artırılması, literatüre sunacağı katkı bakımından önemlidir.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Azize SUDAN ARAN, araştırma sürecinin tasarlanması, literatürün taranması, verilerin toplanması, verilerin analizi, bulguların değerlendirilmesi ve makale yazımında; Ergün ERASLAN, araştırma sürecinin tasarlanması, geliştirilmesi, kontrolü, sonuçların yorumlanması ve metnin revizyonu konularında katkı sağlamıştır.

## Çıkar Çatışması

Bu çalışmada yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynakça

- Abbas, J. R., O'Connor, A., Ganapathy, E., Isba, R., Payton, T., MgGrath, B., ... & Bruce, I. (2023). What is Virtual Reality? A healthcare-focused systematic review of definitions. *Health Policy and Technology*, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.hlpt.2023.100741>.
- Alam, A., Ullah, S., & Ali, N. (2017). The effect of learning-based adaptivity on students' performance in 3D virtual learning environments. *IEEE Access*, 6, 3400-3407. Doi: 10.1109/Access.2017.2783951.
- Al-Aubidy, K. M. (2005). Applying Fuzzy Logic for Learner Modeling and Decision Support in Online Learning Systems. *Journal of Educational Technology*, 2(3), 76-85. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1068843.pdf>
- Allmacher, C., Dudczig, M., Klimant, P., & Putz, M. (2018). Virtual prototyping technologies enabling resource-efficient and human-centered product development. *Procedia Manufacturing*, 21, 749-756. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.180>
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85. <http://www.ihaltas.com/downloads/publications.pdf>
- Al-Tikriti, M. N., & Al-Aubidy, K. M. (2013). Embedding Mixed-Reality Laboratories into E-Learning Systems for Engineering Education. *Journal of Educational Technology*, 9(4), 25-35. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1101724.pdf>
- Bayram, Z., & Temiz, G. (2021). Covid-19 Pandemisinde kanser hastalarında tedavi ve bakım yönetimi: sistematik derleme. *Sakarya Üniversitesi Holistik Sağlık Dergisi*, 4(2), 92-103. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/1741638>.
- Bircan, H., Demir, G., & Güvendi, F. (2020). TOPSİS ve Vikor yöntemleri ile ikinci dil seçimi. *Ulakbilge*, 46, 313-324. Doi: 10.7816/ulakbilge-08-46-08
- Cai, L., Yang, Z., Yang, S. X., & Qu, H. (2013). Modelling and simulating of risk behaviours in virtual environments based on multi-agent and fuzzy logic. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(11), 387. Doi: <https://doi.org/10.5772/5683>
- Capecchi, M., Ciabattini, L., Ferracuti, F., Monteriù, A., Romeo, L., & Verdini, F. (2018). Collaborative design of a telerehabilitation system enabling virtual second opinion based on fuzzy logic. *IET Computer Vision*, 12(4), 502-512. Doi: <https://doi.org/10.1049/iet-cvi.2017.0114>
- Demir, S., Yılmaz, İ., Paksoy, T. (2020) Augmented reality in supply chain management. In Logistics 4.0, pp. 136-145. CRC Press, 2020. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit>
- Emre, İ.E., Selçuk, M., Budak, V.Ö., Bütün, M., Şimşek, İ (2019). Eğitim Amaçlı Sanal Gerçeklik Uygulamalarında Kullanılan Cihazların Daldırma Açısından İncelenmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 12(2), 119-129. Doi: <https://doi.org/10.17671/gazibtd.453381>
- Hagras, H., Alghazzawi, D., & Aldabbagh, G. (2015). Employing type-2 fuzzy logic systems in the efforts to realize ambient intelligent environments [application notes]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 10(1), 44-51. Doi: 10.1109/MCI.2014.2350952
- Hamam, A., Saddik, A. E., & Alja'Am, J. (2014). A quality of experience model for haptic virtual environments. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 10(3), 1-23. Doi: <https://doi.org/10.1145/2540991>
- Issenberg, B., Gordon, M. S., Gordon, D. L., Safford, R. E., & Hart, I. R. (2001). Simulation and new learning technologies. *Medical teacher*, 23(1), 16-23. Doi: <https://doi.org/10.1080/01421590020007324>
- Işık, Y., Kehya, M., & Kayabaşı, A (2023). Araç Sınıflandırma Trafik Hız Sınırı Ceza Sisteminin Bulanık Mantık Temelli Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 115-126. Doi: <https://doi.org/10.46387/bjesr.1258924>



Keskenler, M. F., & Keskenler, E. F. (2017). Bulanık mantığın tarihi gelişimi. *Takvim-i Vekayi*, 5(1), 1-10. Doi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article>

Kıyak, E., & Kahvecioğlu, A. (2003). Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2), (63-72). <https://jast.hho.msu.edu.tr>

Kljuno, E., & Williams, R. L. (2008). Vehicle simulation system: controls and virtual-reality-based dynamics simulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 52, 79-99. Doi: 10.1007/s10846-008-9204-y

Liu, C. L. (2014). A study of detecting and combating cybersickness with fuzzy control for the elderly within 3D virtual stores. *International journal of human-computer studies*, 72 (12), 796-804. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2014.07.002>

Liu, C. L. (2009). A neuro-fuzzy warning system for combating cybersickness in the elderly caused by the virtual environment on a TFT-LCD. *Applied Ergonomics*, 40(3), 316-324. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.12.001>

Lledo, L. D., Bertomeu, A., Díez, J., Badesa, F. J., Morales, R., Sabater, J. M., & Garcia-Aracil, N. (2015). Auto-adaptative robot-aided therapy based in 3d virtual tasks controlled by a supervised and dynamic neuro-fuzzy system. *International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia*, 3(2), 63-56. Doi: 10.9781/ijimai.2015.328

Martínez, J. I., Skarmeta, A. F. G., & Gimeno, J. B. (2006). Fuzzy approach to the intelligent management of virtual spaces. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 36(3), 494-508. Doi: 10.1109/Tsmcb.2005.862494

Mitra, R., & Saydam, S. (2014). Can artificial intelligence and fuzzy logic be integrated into virtual reality applications in mining? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114(12), 1009-1016.

Mohamed, F., Abdeslam, J., & Lahcen, E. B. (2017). Personalization of Learning Activities within a Virtual Environment for Training Based on Fuzzy Logic Theory. *International association for development of the information society*. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED579380.pdf>

Mura, G. (2007). The red and black semantics: a fuzzy language. *The Visual Computer*, 23, 359-368. Doi: 10.1109/cw.2006.38

Öztürk, M., & Paksoy, T. (2016). Otoyollardaki Trafik Işıkları Kontrol Sistemi Modellemesi Bulanık Karar Tabanlı Görsel Uygulaması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(3), 170-183. <http://jes.ksu.edu.tr/tr/download/article-file/264185>.

Polat, M. M., & Yılmaz, İ. (2023). Havacılık Sektöründe Yer Hizmetleri İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinde Sanal Gerçeklik Teknolojisinin Kullanılması Üzerine Bir Araştırma. *Ergonomi*, 6(2), 117-131. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/2904613>.

PRISMA Kontrol Listesi (2020). <http://www.prisma-statement.org/documents/PRISMA>

Qidwai, U., Ajimsha, M. S., & Shakir, M. (2019). The role of EEG and EMG combined virtual reality gaming system in facial palsy rehabilitation A case report. *Journal of bodywork and movement therapies*, 23(2), 425-431. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2019.02.012>

Shahrokhi, M., Bernard, A., & Fadel, G. (2011). An approach to optimise an avatar trajectory in a virtual workplace. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(2), 95-105. Doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2010.531290>

Sun, D., Kiselev, A., Liao, Q., Stoyanov, T., & Loutfi, A. (2020). A new mixed-reality-based teleoperation system for telepresence and maneuverability enhancement. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 50(1), 55-67.

- Şekerci C. (2017) Sanal Gerçeklik Kavramının Tarihçesi. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 10(54). 1126-1133. Doi: 10.1109/thms.2019.2960676
- Thekkedan, M. D., Chin, C. S., & Woo, W. L. (2015). Virtual reality simulation of fuzzy-logic control during underwater dynamic positioning. *Journal of Marine Science and Application*, 14, 14-24. DOI: 10.1007/s11804-015-1297-7
- Torano, J., Diego, I., Menendez, M., & Gent, M. (2008). A finite element method (FEM) - Fuzzy Logic (Soft Computing): virtual reality model approach in a coalface longwall mining simulation. *Automation in construction*, 17(4), 413-424. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.07.001>
- Wang, Y., Chardonnet, J. R., Merienne, F., & Ovtcharova, J. (2021, March). Using fuzzy logic to involve individual differences for predicting cybersickness during vr navigation. In 2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR) pp. 373-38. Doi: 0.1109/vr50410.2021.00060
- Ye, C., Yung, N. H., & Wang, D. (2003). A fuzzy controller with supervised learning assisted reinforcement learning algorithm for obstacle avoidance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 33(1), 17-27. Doi: 10.1109/tsmcb.2003.808179
- Yıldırım, D., Özer, Z., Kocaağalar, E., & Bölüktaş, R. P. (2019). Eğitimde İnovasyon: Sağlık Eğitiminde Simülasyon Kullanımı. *Bilgi Ekonomisi ve Yönetimi Dergisi*, 14(1), 33-41. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/745611>
- Yıldızbaşı, A., Öztürk, C., Yılmaz, İ., & Arıöz, Y. (2021, August). Key challenges of lithium-ion battery recycling process in circular economy environment: Pythagorean fuzzy AHP approach. In *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems* (pp. 561-568). Cham: Springer International Publishing. <https://www.researchgate.net/publication/357159886>
- Yılmaz, E., Isler, V., & Çetin, Y. Y. (2009). The virtual marathon: Parallel computing supports crowd simulations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29(4), 26-33. Doi: 10.1109/mcg.2009.77
- Yılmaz, I., & Polat, L. (2023). Celiac disease multi-purpose diet plan through integrated goal programming and Interval Type 2 Fuzzy TOPSIS method. *Expert Systems with Applications*, 218, 119618. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119618>
- Yılmaz, I. (2023). A hybrid DEA–fuzzy COPRAS approach to the evaluation of renewable energy: A case of wind farms in Turkey. *Sustainability*, 15(14), 11267. Doi: <https://doi.org/10.3390/su151411267>
- Yu, Y., El Kamel, A., & Gong, G. (2014). Modeling and simulation of overtaking behavior involving environment. *Advances in Engineering Software*, 67, 10-21. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.07.00>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, 8(3), 338-353. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zhang, H., He, X., & Mitri, H. (2019). Fuzzy comprehensive evaluation of virtual reality mine safety training system. *Safety Science*, 120, 341-351. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.07.009>
- UNC Library (2023). <https://guides.lib.unc.edu/systematic-reviews>



# Journal of Turkish Operations Management

## Assessing column stability: a comparative study of machine learning regression models for shear strength prediction

Aybike Özyüksel Çiftçioğlu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Manisa Celal Bayar University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Manisa, Türkiye  
aybike.ozyuksel@cbu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-4424-7622>

\*Corresponding Author

### Article Info

#### Article History:

Received: 06.12.2023  
Revised: 22.03.2024  
Accepted: 07.04.2024

### Keywords

Machine Learning, Random Forest,  
Reinforced concrete, Regression, Shear  
Strength

### Abstract

This research presents a comprehensive investigation into the accurate estimation of shear strength in rectangular reinforced concrete columns through advanced machine learning (ML) models. The study addresses the intricate challenge posed by shear strength complexity, which is crucial for evaluating column stability and ensuring structural integrity. Building upon a substantial dataset comprising 545 experimental observations sourced from diverse literature, this research establishes a robust foundation for predictive modeling. Four distinct ML regression models, Random Forest, Decision Tree, XGBoost, and LightGBM, are meticulously evaluated for their performance. The evaluation employs established metrics, including  $R^2$ , RMSE, MAE, and MAPE to quantify their predictive capabilities. The outcomes highlight the models' robustness in capturing nuanced variations in shear strength, with impressive  $R^2$  values ranging from 93.6% to 93.9%, showcasing their exceptional ability to elucidate intricate shear behaviors. Furthermore, comparative analysis indicates the slightly superior performance of the Random Forest over the Decision Tree, highlighting the efficacy of ensemble methods in this context. Extending the exploration to include XGBoost and LightGBM, the study showcases their potential as accurate shear strength predictors. The performance of the models is validated through scatter plots and error distribution plots, confirming accurate shear strength predictions across various scenarios. This research significantly advances structural engineering methodologies by demonstrating the potential of ML to enhance shear strength estimation accuracy. The findings not only underscore the exceptional performance of ML models but also provide valuable insights into their comparative effectiveness, paving the way for enhanced structural assessments in columns.

## 1. Introduction

Reinforced concrete (RC) columns are crucial structural elements in the field of civil engineering, providing essential support and stability to buildings and infrastructures worldwide (Özyüksel Çiftçioğlu & Naser, 2022). These columns are designed to withstand a variety of forces, including compression, bending, and shear. Although significant research has been conducted to accurately predict their behavior under various loading conditions, one particular aspect that requires the utmost attention is the accurate estimation of shear strength in RC columns (Park et al., 2012; Zhou & Liu, 2010).

Shear strength plays a pivotal role in determining the overall structural integrity and safety of RC columns. Unlike compression and bending forces, which are relatively more predictable, shear forces exert complex effects on these columns, making their accurate estimation a formidable challenge. Shear failure can occur suddenly and catastrophically, leading to the collapse of the entire structure. Therefore, a precise prediction of shear strength is of paramount importance to ensure structural reliability and avoid potential disasters (Wong & Kuang, 2014).

The implications of underestimating or overestimating the shear strength of the RC columns are profound. If the shear strength is underestimated, it could lead to inadequate reinforcement or a lack of appropriate design measures. This, in turn, increases the risk of premature shear failure, compromising structural stability, and posing a threat to the safety of occupants. However, overestimating shear strength can result in an overly conservative design, leading to unnecessary material and financial costs. Therefore, achieving an accurate prediction of shear strength is essential not only for safety but also to optimize construction practices and resource allocation.

The challenges in accurately estimating shear strength arise from the intricate interplay between various factors influencing the behavior of RC columns. These factors include concrete strength, reinforcement detailing, column dimensions, loading conditions, and boundary constraints. Researchers and engineers face the ongoing task of developing reliable models and techniques to capture complex shear behavior and accurately estimate the shear strength of RC columns.

Machine learning (ML) has emerged as a promising approach to address the challenges associated with accurately estimating shear strength in RC columns. ML techniques leverage the power of data-driven analysis and computational algorithms to uncover intricate patterns and relationships within complex systems (Babaei Tirkolaee et al., 2020; Khalilpourazari et al., 2020; Khalilpourazari & Hashemi Doulabi, 2022; Moslemi et al., 2021). In the realm of civil engineering, ML offers a unique opportunity to improve our understanding of shear behavior by integrating a multitude of influencing factors and their interactions. Using historical data on RC column performance and behavior under diverse loading conditions, ML models can learn from this information and make generalizations accordingly. This allows them to make predictions about shear strength that go beyond the limitations of traditional analytical methods (Emam et al., 2021; Zavvar Sabegh et al., 2014). ML algorithms, such as decision trees, support vector machines, neural networks, and ensemble methods, can be trained on datasets comprising various column geometries, material properties, loading scenarios, and failure modes. The models can then capture intricate nonlinear relationships that might be challenging to express through conventional equations (Khalilpourazari & Pasandideh, 2016). One of the significant advantages of using ML for shear strength estimation is its adaptability to changing conditions and new data. As new research findings and experimental data become available, ML models can be updated and refined, continuously improving their accuracy (Hashemi Doulabi & Khalilpourazari, 2023; Khalilpourazari & Doulabi, 2021; Mohammadi & Khalilpourazari, 2017; Naser & Çiftçioğlu, 2022; Naser & Çiftçioğlu, 2023; Özyüksel Çiftçioğlu, 2023).

Traditional methods often fail when confronted with the intricate and multifaceted nature of shear strength in RC columns. The variation in material properties, geometric configurations, and loading conditions poses challenges that traditional approaches struggle to address comprehensively. This inadequacy not only highlights the limitations of conventional methods but also creates a void in the literature on robust and universally applicable models for shear strength prediction. The gap in the literature becomes increasingly evident when considering the diverse scenarios and configurations encountered in real-world applications. Conventional methods, relying on simplified assumptions and empirical equations, may lack the flexibility and adaptability required to capture the intricate interplay of factors influencing shear strength in RC columns. As a result, there is a compelling need for advanced methodologies that can surpass the limitations of traditional approaches and offer more accurate and versatile predictions. This research seeks to address this gap in the literature by introducing ML as a powerful tool for shear strength prediction in RC columns.

Integration of ML into the realm of civil engineering leads to a significant change in the approach to estimating shear strength in RC columns. It allows for a more holistic and data-driven understanding of this complex phenomenon, enabling more accurate predictions and better-informed design decisions. As researchers and practitioners continue to bridge the gap between traditional engineering principles and modern data-driven techniques, the potential to optimize structural safety, construction practices, and resource allocation remains a compelling prospect.

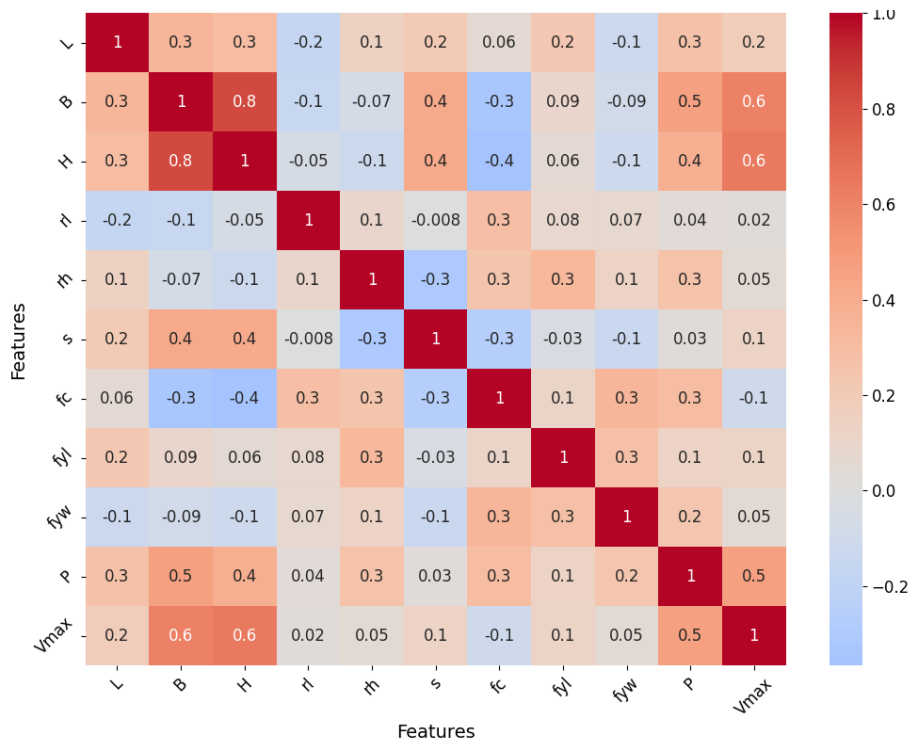
## 2. Database

A comprehensive compilation of 545 experimental data sets on rectangular RC columns has been meticulously gathered from the literature (A. & O., 1984; Ahn & Shin, 2007; Belkacem et al., 2019; Dinh et al., 2019; Eom et al., 2014; Ghannoum et al., 2012; Goksu et al., 2014; Ho, 2012; Hugo et al., 2016; Hwang & Yun, 2004; Karbasi Arani et al., 2013, 2014; Lam et al., 2003; Y.-A. Li et al., 2014; Y. Li et al., 2018; Marefat et al., 2006; Melo et al., 2015; Shi et al., 2021; Woods et al., 2007; J. Zhang et al., 2020; Y. Zhang et al., 2019). The investigation requires the provision of ten crucial input parameters, including geometric dimensions, bar specifications, material properties, and axial load ( $P$ ), to accurately estimate the shear strength of RC columns ( $V_{max}$ ). The geometric dimensions encompass the height of the column ( $L$ ), the width of the cross-section ( $B$ ), and the length of the cross-section ( $H$ ). Reinforcement details constitute the longitudinal reinforcement ratio ( $\rho_l$ ), the transverse reinforcement bar ratio ( $\rho_h$ ), and the spacing of transverse reinforcements ( $s$ ), all of which significantly influence the capacity of the column to resist shear forces. Incorporating the properties of the material is of utmost importance, and we take into account the yield strength of both longitudinal ( $f_{yl}$ ) and transverse ( $f_{yw}$ ) reinforcing bars, as well as the compressive strength of the concrete ( $f_c$ ). These characteristics of the material directly affect the overall performance and structural integrity of the RC columns under varying load conditions. The descriptive statistics for the variables are presented in Table 1, covering the minimum, maximum, mean, and standard deviation values.

**Table 1.** Descriptive statistics of the dataset

	$L$	$B$	$H$	$\rho_l$	$\rho_h$	$s$	$f_c$	$f_{yl}$	$f_{yw}$	$P$	$V_{max}$
min	225.00	108.50	100.00	0.20	0.01	20.00	20.00	77.06	215.00	0.00	13.34
max	3000.00	610.00	610.00	4.50	4.00	457.20	141.00	745.00	1470.00	5491.75	982.00
mean	1285.87	284.20	301.00	2.15	0.95	101.41	49.12	447.90	496.88	1135.67	228.61
st dv	651.85	109.51	115.65	0.70	0.94	78.54	27.37	79.71	226.32	1083.46	175.22

Figure 1 illustrates a visual representation of the colormap correlation matrix. This matrix effectively portrays the relationships between variables within the dataset. Notably, the colors red and blue denote strong positive and negative correlations, respectively. The correlation matrix distinctly reveals that variables  $B$  (cross-section),  $H$  (cross-section length), and  $P$  (axial load) exhibit a significant correlation coefficient of +0.6 in relation to the shear strength of the RC columns. Furthermore, it should be noted that the variable  $f_c$  (compressive strength of concrete) has a negative correlation coefficient of -0.1 with compressive strength.



**Figure 1.** Correlation matrix of variables in the dataset

### 3. Methodology

#### 3.1. Random Forest

Random Forest (RF) is a powerful and widely used ensemble learning technique in the field of ML (Breiman, 2001). It is renowned for its robustness, versatility, and excellent predictive performance in both classification and regression tasks. RF has gained popularity due to its ability to handle complex data sets and mitigate issues like overfitting. The method is an extension of the DT algorithm, and it combines multiple individual decision trees to form a more accurate and reliable predictor. The fundamental principle behind RF lies in aggregating the predictions of multiple decision trees, thereby forming a forest of trees. Each tree in the forest is trained on a random subset of the data, and at each split, a random subset of features is considered. This randomness introduces diversity among the trees, reducing overfitting and enhancing the generalization ability of the model. During the prediction phase, the final output is determined by averaging (in regression) or voting (in classification) the outputs of individual trees, resulting in a more robust and accurate prediction. In the classification context, RF constructs multiple decision trees during the training phase (Liu et al., 2021; X. Zhang et al., 2021). Each decision tree is built on a random subset of the training data, and at each split, a random subset of features is considered. During inference, each decision tree in the forest independently predicts the class label for a given input, and the final class is determined by majority voting. On the other hand, RF is equally adept at solving regression problems. In regression tasks, the algorithm assembles multiple decision trees just as in the classification setting, but the predictions from each individual tree are averaged instead of voting. Consequently, the final prediction is the mean of the results from all decision trees. This averaging process ensures that the RF regression model can capture complex nonlinear relationships between features and the target variable while also mitigating the effects of outliers and noise. RF finds extensive applications in various engineering domains. In civil engineering, it can help predict structural integrity, soil stability, etc. The proficiency of the algorithm in handling high-dimensional data and accommodating intricate non-linear relationships renders it an invaluable instrument for addressing intricate engineering challenges and augmenting decision-making endeavors within diverse industrial contexts.

#### 3.2. Decision Tree

The Decision Tree (DT) algorithm is a widely employed and interpretable ML technique that serves as a powerful tool for classification and regression tasks (Quinlan, 1986). Its fundamental principle lies in partitioning the feature space into a hierarchical structure of nodes, where each node represents a decision based on a particular feature, leading to subsequent splits until the leaf nodes produce the final predictions. Decision trees are extensively utilized due to their ability to handle categorical and numerical data, their ease of interpretability, and their ability to capture nonlinear relationships between features (Naser, 2021; Rajakarunakaran et al., 2022). The construction of a DT starts with selecting the most informative feature of the dataset to create the root node. The subsequent nodes are generated by iteratively choosing the best feature and its optimal split point, which maximizes information gain or minimizes impurity. Information gain measures the reduction in uncertainty after a split, whereas impurity refers to the homogeneity of the target values within a node. The recursive partitioning process continues until predefined termination conditions are met, such as reaching a specified depth or having a minimum number of data points in a leaf node. To avoid overfitting, techniques such as pruning or setting a minimum number of samples per leaf are commonly used. Decision trees find wide-ranging applications in engineering disciplines due to their versatility and comprehensibility. Their capability to handle large datasets and effectively model complex systems has positioned Decision Trees as a valuable asset in the engineering domain, enabling informed decision-making and problem-solving across various sectors.

#### 3.3. Extreme Gradient Boosting

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) is a state-of-the-art ML algorithm renowned for its exceptional predictive capabilities (Chen & Guestrin, 2016). XGBoost has gained widespread popularity in both academia and industry due to its outstanding performance across a diverse array of tasks, including regression, classification, and ranking (Nguyen-Sy et al., 2020; Nguyen et al., 2021). The efficacy of the algorithm comes from its ability to blend the advantages of boosting and gradient descent, enabling it to handle complex high-dimensional data with remarkable accuracy and efficiency. XGBoost operates by building an ensemble of weak learners, typically decision trees, in a sequential manner. Each subsequent tree aims to correct the errors of the previous ones, progressively refining the predictions. The algorithm employs a combination of regularization techniques, such as regularization L1 and L2, to avoid overfitting and improve generalization. Additionally, it employs a novel "gradient boosting" strategy to minimize a cost function by iteratively fitting weak learners to the negative gradient of the loss function. This technique facilitates optimizing the performance of the model by minimizing prediction errors. In the realm of engineering, XGBoost has found extensive applications across various domains. Its speed and adaptability enable engineers to effectively handle large-scale datasets and complex relationships, making XGBoost an indispensable

tool to solve intricate engineering challenges and improve decision-making processes in diverse engineering applications.

### 3.4. Light Gradient Boosting Machine

Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) is a gradient-boosting framework that has gained remarkable popularity in the field of ML due to its efficiency and high performance (Ke et al., 2017). It is based on the concept of gradient boosting, which involves sequentially adding weak learners (typically decision trees) to improve the accuracy of the model. What sets LightGBM apart is its focus on optimizing both training speed and memory consumption, making it well-suited for handling large-scale datasets and computationally intensive tasks. The core idea behind LightGBM lies in its novel approach to tree construction and leaf-wise growth strategy. Unlike traditional depth-first tree growth, LightGBM adopts a leaf-wise approach, where it selects the leaf node with the maximum decrease in the loss function during each tree expansion. This technique significantly reduces the number of nodes and the depth of the tree, thereby reducing computation time and memory usage (Ma et al., 2022). Additionally, LightGBM employs a histogram-based method to quantize feature values into discrete bins, further accelerating the training process. The algorithm also offers various regularization techniques, such as L1 and L2 regularization, to prevent overfitting and enhance generalization. LightGBM finds wide applications in various engineering domains, due to its ability to handle large-scale datasets and efficiently tackle complex problems. The superior performance and scalability of the algorithm make it a valuable asset in engineering domains where data volume and computational resources are paramount concerns, empowering engineers to make informed decisions and deliver efficient and accurate solutions.

## 4. Results and Discussion

In this study, a comprehensive analysis employing four distinct ML models was conducted to perform regression analyses. The primary objective of the investigation was to accurately predict the shear strength ( $V_{max}$ ) of the RC columns. The dataset was split into training and test sets using the `train_test_split` function from the scikit-learn library, with a test size of 25% and a random state of 0. Specifically, 75% of the data was used for training the models, while the remaining 25% was reserved for testing. This approach ensures that the models are trained on a sufficiently large portion of the data while also allowing for robust evaluation on unseen data. The regression models used in the study were RF, DT, XGBoost, and LightGBM. The parameters of these ML models, including maximum depth, learning rate, and other hyperparameters, were detailed in Table 2. It is important to note that Python programming language (Van Rossum & Drake Jr, 1995), along with its libraries such as scikit-learn and XGBoost, was utilized for implementing and training these ML models.

**Table 2.** Specifications of Machine Learning Models

Model	Parameters
RF	<code>n_estimators=19, random_state=0, max_depth=None, min_samples_split=2</code>
DT	<code>max_depth=10, min_samples_split=2, random_state=42</code>
XGBoost	<code>n_estimators=100, max_depth=10, random_state=42, learning_rate=0.2, subsample=1.0, colsample_bytree=0.8</code>
LightGBM	<code>n_estimators=100, random_state=0, max_depth=10, min_child_samples=10</code>

The performance of each model was evaluated based on several key metrics, including Coefficient of Determination ( $R^2$ ), Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE). The obtained results are summarized in Table 3.

**Table 3.** Performance Evaluation of Regression Models

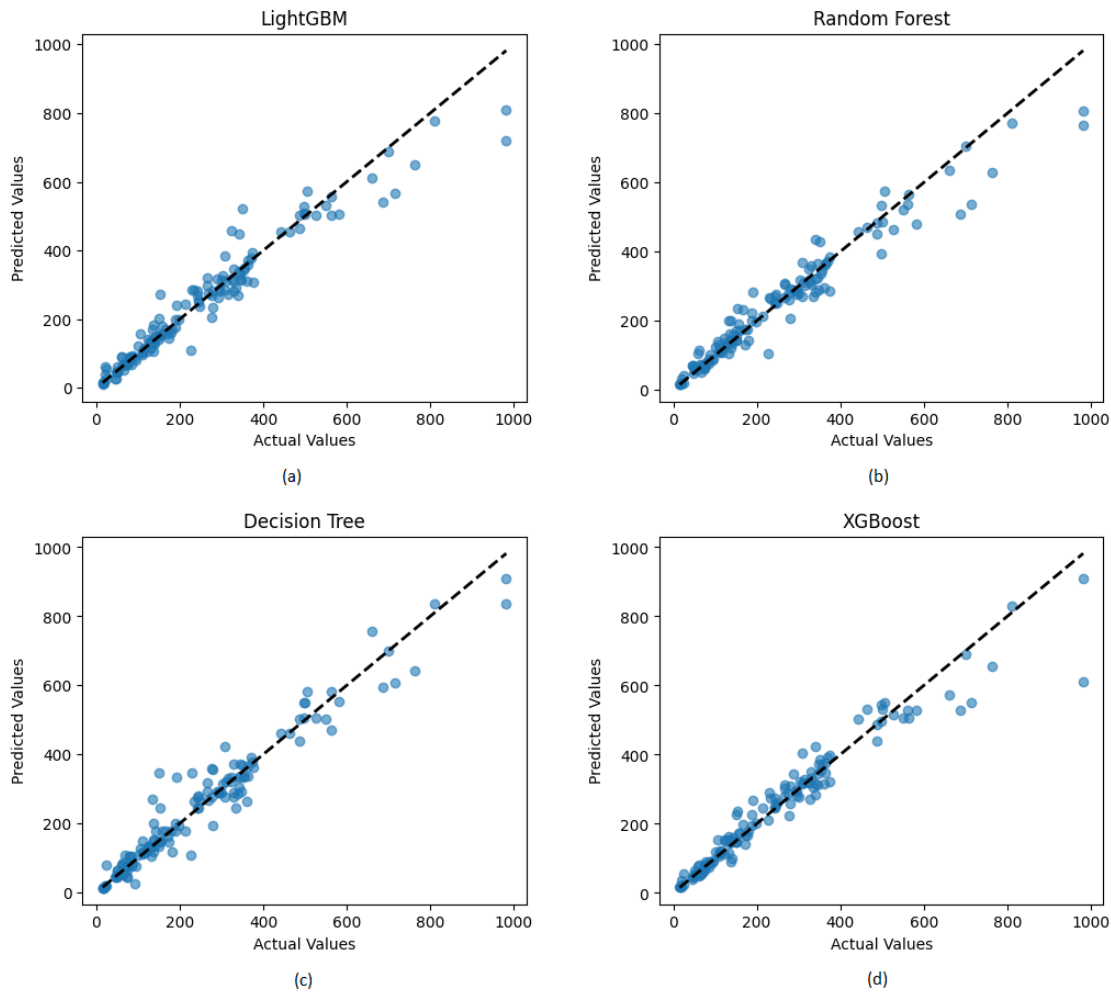
Algorithm	Data	$R^2$	RMSE	MAE	MAPE (%)
RF	Test	0.939	48.278	28.972	13.862
DT	Test	0.939	48.327	30.863	16.530
XGBoost	Test	0.937	49.048	27.119	12.215
LightGBM	Test	0.936	49.560	29.155	15.302
RF	Train	0.985	20.830	12.555	7.045

DT	Train	0.998	8.411	3.586	2.055
XGBoost	Train	0.999	0.218	0.120	0.095
LightGBM	Train	0.994	13.372	8.493	4.729

The results indicate strong predictive capabilities of the employed ML models, with  $R^2$  values ranging from 0.936 to 0.939. These coefficients of determination suggest that the models can explain approximately 93.6% to 93.9% of the variability in the shear strength of RC columns. Moreover, the relatively low values of RMSE, MAE, and MAPE demonstrate the accuracy of the predictions and the robustness of the models across different algorithms. The RF and DT models yield comparable results in terms of  $R^2$ , while the RF model outperforms slightly in terms of RMSE, MAE, and MAPE. This underscores the effectiveness of ensemble methods in capturing complex relationships within the dataset. Furthermore, both XGBoost and LightGBM exhibit promising results, demonstrating their potential for accurate shear strength estimation. It is worth noting that the observed MAPE values, ranging from 12.215% to 16.530%, indicate the percentage error in the predictions. This insight is valuable for assessing the practical utility of the models in engineering applications, as it provides an understanding of the potential variability in the estimated shear strength.

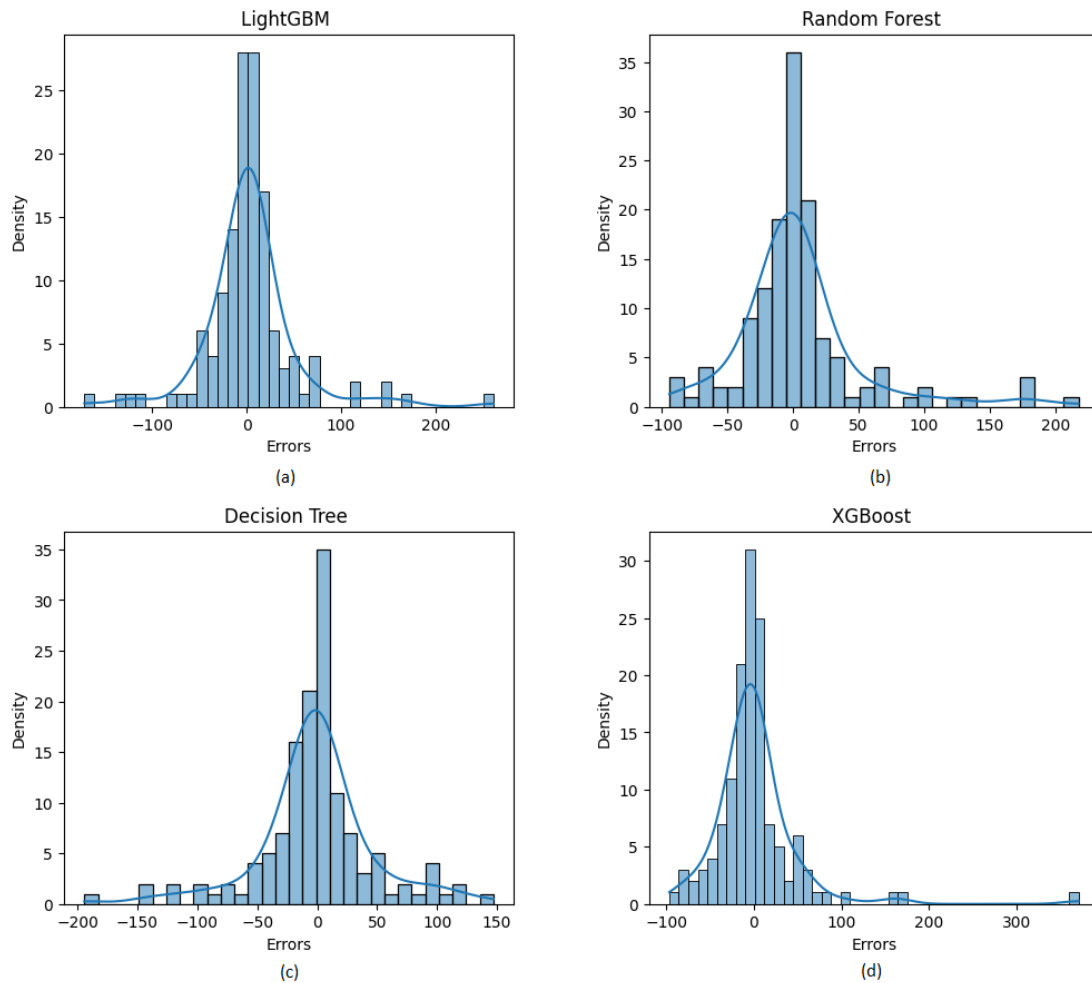
In Figure 2, scatter plots illustrating the predictions of the four employed ML regression models are presented. These plots depict the relationship between the predicted shear strength values and the actual shear strength values for each data point in the test dataset. This visual representation enables a comprehensive assessment of the predictive performance of the model and provides information on its accuracy in the range of shear strength values. The scatter plots highlight the alignment of the predicted values with the ideal diagonal line, which represents perfect predictions. Notably, all four models exhibit a consistent pattern of predictions closely clustered around this diagonal line, indicating strong predictive capabilities. Despite slight variations, the scatter plots reveal that the predictions closely follow the actual values, affirming the models' ability to capture the underlying trends and relationships within the dataset. This observation is consistent with the quantitative results presented in Table 1, where metrics such as  $R^2$ , RMSE, MAE, and MAPE indicated favorable predictive performance. Moreover, the dispersion of points around the diagonal line suggests that the models perform consistently across the entire range of shear strength values. This consistency is crucial in engineering applications where accurate predictions are essential across a broad spectrum of scenarios. The scatter plots further emphasize the proficiency of the RF and DT models, as their predictions align more closely with the ideal diagonal line compared to the other models. This alignment signifies the robustness of the models to handle the various patterns present in the dataset. The XGBoost and LightGBM models also demonstrate respectable alignment, reinforcing their viability for shear strength estimation.





**Figure 2.** Scatter Plots for Regression Models

Figure 3 displays the error distribution plots corresponding to the predictions generated by the four distinct ML regression models. These plots illustrate the distribution of errors between the predicted shear strength values and the actual shear strength values across the test dataset. This visualization provides insight into the ability of the models to consistently estimate shear strength and the magnitude of errors associated with their predictions. The error distribution plots depict a symmetric distribution of errors centered around zero for all four models. This symmetry signifies that the models tend to produce predictions with balanced overestimations and underestimations, indicating the absence of systemic biases. While the majority of errors are clustered around zero, there are occasional instances of larger errors. However, these occurrences are limited and do not deviate significantly from the central trend. This observation aligns with the quantitative metrics reported earlier, such as the MAE and RMSE, which demonstrated relatively low magnitudes. Furthermore, the error distribution plots provide evidence of the consistency of the models in terms of error magnitudes across the entire range of shear strength values. This uniformity in the error distribution is an essential characteristic in applications where reliable predictions are crucial in various scenarios. The RF and DT models exhibit narrower error distributions, indicating their precision in generating predictions close to the actual shear strength values. This precision is consistent with the visual and numerical findings presented in the scatter plots (Figure 2) and the performance metrics in Table 1. The XGBoost and LightGBM models also demonstrate commendable error distribution patterns, indicating their potential utility for shear strength estimation tasks.



**Figure 3.** Error Distribution Plots for Regression Models

## 5. Conclusions

This research underscores the formidable potential of ML models in estimating shear strength, contributing substantially to advances in structural engineering methodologies. Research findings highlight the significant predictive capacity inherent in the ML models, demonstrating exceptional coefficients of determination ranging from 93.6% to 93.9% in relation to the variations observed in the shear strength of the RC columns. The comparative analysis highlights the effectiveness of the ensemble methods, with the RF model showing slight superiority in predictive performance over the DT model. Moreover, the expansion of the investigation to incorporate XGBoost and LightGBM models accentuates their promising role in precise estimation tasks related to shear strength. Scatter plots visually validate the models' proficiency in predicting shear strength values across a range of scenarios, while error distribution plots emphasize the models' balanced overestimations and underestimations, reinforcing their reliability. In essence, this study underscores the potential of ML models to significantly enhance shear strength estimation accuracy, thus contributing to the advancement of structural engineering practices. While this study provides valuable insights into the estimation of shear strength using ML models, several avenues for future research could be explored to further advance this field. One potential direction could involve investigating the applicability of advanced ML techniques, such as deep learning algorithms, in predicting shear strength with even greater accuracy. Additionally, incorporating more diverse datasets encompassing a wider range of structural configurations and material properties could enhance the generalizability of the developed models. However, it is imperative to acknowledge the limitations inherent in the present study. The reliance on experimental data entails inherent constraints regarding the extrapolation of findings to real-world applications within the field of structural engineering. Furthermore, the accuracy of the predictive models is contingent upon the quality and representativeness of the dataset, which may not fully encapsulate the intricate nuances of structural behavior across diverse operational conditions. Additionally, the narrow focus on shear

strength estimation may inadvertently disregard other pivotal factors influencing structural performance, including but not limited to material aging, variations in construction methodologies, and environmental influences.

## Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

## Informed Consent

The research and publication processes adhered to ethical standards and guidelines. No legal or special permissions were required for conducting or publishing this research.

## References

- A., W. K., & O., J. J. (1984). Influence of Reinforcement on RC Short Column Lateral Resistance. *Journal of Structural Engineering*, 110(1), 90–104. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:1(90))
- Ahn, J.-M., & Shin, S.-W. (2007). An evaluation of ductility of high-strength reinforced concrete columns subjected to reversed cyclic loads under axial compression. *Magazine of Concrete Research - MAG CONCR RES*, 59, 29–44. <https://doi.org/10.1680/mac.2007.59.1.29>
- Babae Tirkolae, E., Goli, A., & Weber, G.-W. (2020). Fuzzy Mathematical Programming and Self-Adaptive Artificial Fish Swarm Algorithm for Just-in-Time Energy-Aware Flow Shop Scheduling Problem With Outsourcing Option. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28(11), 2772–2783. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2998174>
- Belkacem, M. A., Bechtoula, H., Bourahla, N., & Belkacem, A. A. (2019). Effect of axial load and transverse reinforcements on the seismic performance of reinforced concrete columns. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13(4), 831–851. <https://doi.org/10.1007/s11709-018-0513-3>
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- Dinh, N. H., Park, S.-H., & Choi, K.-K. (2019). Seismic performance of reinforced concrete columns retrofitted by textile-reinforced mortar jackets. *Structure and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1708958>
- Emam, O., Younis Haggag, R. M., & Mohamed, N. (2021). A Survey Paper in Transportation Logistics based on Artificial Intelligence. *International Journal of Supply and Operations Management*, 8(4), 458–477. <https://doi.org/10.22034/IJSOM.2021.4.6>
- Eom, T.-S., Kang, S.-M., Park, H.-G., Choi, T.-W., & Jin, J.-M. (2014). Cyclic loading test for reinforced concrete columns with continuous rectangular and polygonal hoops. *Engineering Structures*, 67, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.023>
- Ghannoum, W., Sivaramakrishnan, B., Pujol, S., Catlin, A. C., Fernando, S., Yoosuf, N., & Wang, Y. (2012). *ACI 369 rectangular column database. Network for Earthquake Engineering Simulation (Database)*. [https://datacenterhub.org/dataviewer/view/neesdatabases:db/aci\\_369\\_rectangular\\_column\\_database/](https://datacenterhub.org/dataviewer/view/neesdatabases:db/aci_369_rectangular_column_database/)
- Goksu, C., Yilmaz, H., Chowdhury, S., Orakcal, K., & Ilki, A. (2014). The Effect of Lap Splice Length on the Cyclic Lateral Load Behavior of RC Members with Low-Strength Concrete and Plain Bars. *Advances in Structural Engineering*, 17, 639–658. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.5.639>
- Hashemi Doulabi, H., & Khalilpourazari, S. (2023). Stochastic weekly operating room planning with an exponential number of scenarios. *Annals of Operations Research*, 328(1), 643–664. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04686-4>
- Ho, J. C. M. (2012). Experimental Tests on High-Strength Concrete Columns Subjected to Combined Medium Axial Load and Flexure. *Advances in Structural Engineering*, 15(8), 1359–1374. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.15.8.1359>
- Hugo, R., André, F., & António, A. (2016). Behavior of Rectangular Reinforced-Concrete Columns under Biaxial Cyclic Loading and Variable Axial Loads. *Journal of Structural Engineering*, 142(1), 4015085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001345](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001345)

- Hwang, S.-K., & Yun, H.-D. (2004). Effects of transverse reinforcement on flexural behaviour of high-strength concrete columns. *Engineering Structures*, 26, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.004>
- Karbasi Arani, K., Di Ludovico, M., Marefat, M., Prota, A., & Manfredi, G. (2014). Lateral Response Evaluation of Old Type Reinforced Concrete Columns with Smooth Bars. *Acı Structural Journal*, 111. <https://doi.org/10.14359/51686734>
- Karbasi Arani, K., Marefat, M., Amrollahi-Biucky, A., & Khanmohammadi, M. (2013). Experimental seismic evaluation of old concrete columns reinforced by plain bars. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 22. <https://doi.org/10.1002/tal.686>
- 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. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 3149–3157. [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/6449f44a102fde848669bdd9eb6b76fa-Paper.pdf)
- Khalilpourazari, S., & Doulabi, H. (2021). Using reinforcement learning to forecast the spread of COVID-19 in France. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ICAS49788.2021.9551174>
- Khalilpourazari, S., & Hashemi Doulabi, H. (2022). A flexible robust model for blood supply chain network design problem. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04673-9>
- Khalilpourazari, S., Mirzazadeh, A., Weber, G.-W., & Pasandideh, S. H. R. (2020). A robust fuzzy approach for constrained multi-product economic production quantity with imperfect items and rework process. *Optimization*, 69(1), 63–90. <https://doi.org/10.1080/02331934.2019.1630625>
- Khalilpourazari, S., & Pasandideh, S. (2016). Bi-objective optimization of multi-product EPQ model with backorders, rework process and random defective rate. <https://doi.org/10.1109/INDUSENG.2016.7519346>
- Lam, S., Wu, B., Wong, Y., Wang, Z. Y., Liu, Z., & Li, C. (2003). Drift Capacity of Rectangular Reinforced Concrete Columns with Low Lateral Confinement and High-Axial Load. *Journal of Structural Engineering-Asce - J STRUCT ENG-ASCE*, 129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:6\(733\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:6(733))
- Li, Y.-A., Huang, Y.-T., & Hwang, S.-J. (2014). Seismic Response of Reinforced Concrete Short Columns Failed in Shear. *ACI Structural Journal*, 111. <https://doi.org/10.14359/51686780>
- Li, Y., Cao, S., & Jing, D.-H. (2018). Concrete Columns Reinforced with High-Strength Steel Subjected to Reversed Cycle Loading. *ACI Structural Journal*, 115. <https://doi.org/10.14359/51701296>
- Liu, T., Wang, Z., Zeng, J., & Wang, J. (2021). Machine-learning-based models to predict shear transfer strength of concrete joints. *Engineering Structures*, 249, 113253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113253>
- Ma, L., Zhou, C., Lee, D., & Zhang, J. (2022). Prediction of axial compressive capacity of CFRP-confined concrete-filled steel tubular short columns based on XGBoost algorithm. *Engineering Structures*, 260, 114239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114239>
- Marefat, M. S., Khanmohammadi, M., Bahrani, M. K., & Goli, A. (2006). Experimental Assessment of Reinforced Concrete Columns with Deficient Seismic Details under Cyclic Load. *Advances in Structural Engineering*, 9(3), 337–347. <https://doi.org/10.1260/13694330677641959>
- Melo, J., Varum, H., & Rossetto, T. (2015). Experimental cyclic behaviour of RC columns with plain bars and proposal for Eurocode 8 formula improvement. *Engineering Structures*, 88, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.033>
- Mohammadi, M., & Khalilpourazari, S. (2017). Minimizing Makespan in a single machine scheduling problem with deteriorating jobs and learning effects. <https://doi.org/10.1145/3056662.3056715>
- Moslemi, S., Mirzazadeh, A., Weber, G.-W., & Sobhanallahi, M. A. (2021). Integration of neural network and AP-NDEA model for performance evaluation of sustainable pharmaceutical supply chain. *OPSEARCH*. <https://doi.org/10.1007/s12597-021-00561-1>
- Naser, M. Z. (2021). Mechanistically Informed Machine Learning and Artificial Intelligence in Fire Engineering and Sciences. *Fire Technology*, 1–44. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01069-8>
- Naser, M. Z., & Ciftcioglu, A. O. (2022). Causal Discovery and Causal Learning for Fire Resistance Evaluation: Incorporating Domain Knowledge. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2204.05311>
- Naser, M. Z., & Çiftçiöğlü, A. Ö. (2023). Revisiting Forgotten Fire Tests: Causal Inference and Counterfactuals for Learning Idealized Fire-Induced Response of RC Columns. *Fire Technology*, 59(4), 1761–1788. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01405-8>

- Nguyen-Sy, T., Wakim, J., To, Q. D., Vu, M. N., Nguyen, T. D., & Nguyen, T. T. (2020). Predicting the compressive strength of concrete from its compositions and age using the extreme gradient boosting method. *Construction and Building Materials*, 260, 119757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119757>
- Nguyen, H., Vu, T., Vo, T. P., & Thai, H. T. (2021). Efficient machine learning models for prediction of concrete strengths. *Construction and Building Materials*, 266, 120950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120950>
- Özyüksel Çiftçioğlu, A. (2023). RAGN-L: A Stacked Ensemble Learning Technique for Classification of Fire-Resistant Columns. *Expert Systems with Applications*, 240(November 2023), 122491. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122491>
- Özyüksel Çiftçioğlu, A., & Naser, M. Z. (2022). Hiding in plain sight: What can interpretable unsupervised machine learning and clustering analysis tell us about the fire behavior of reinforced concrete columns? *Structures*, 40(April), 920–935. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.076>
- Park, H.-G., Yu, E.-J., & Choi, K.-K. (2012). Shear-strength degradation model for RC columns subjected to cyclic loading. *Engineering Structures*, 34, 187–197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.08.041>
- Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>
- Rajakarunakaran, S. A., Lourdu, A. R., Muthusamy, S., Panchal, H., Jawad Alrubaie, A., Musa Jaber, M., Ali, M. H., Tlili, I., Maselena, A., Majdi, A., & Ali, S. H. M. (2022). Prediction of strength and analysis in self-compacting concrete using machine learning based regression techniques. *Advances in Engineering Software*, 173, 103267. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103267>
- Shi, Q., Ma, L., Wang, Q., Wang, B., & Yang, K. (2021). Seismic performance of square concrete columns reinforced with grade 600 MPa longitudinal and transverse reinforcement steel under high axial load. *Structures*, 32, 1955–1970. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.110>
- Van Rossum, G., & Drake Jr, F. L. (1995). *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, <https://ir.cwi.nl/pub/5008>.
- Wong, H. F., & Kuang, J. S. (2014). Predicting shear strength of RC interior beam–column joints by modified rotating-angle softened-truss model. *Computers & Structures*, 133, 12–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.11.008>
- Woods, J., Kioussis, P., Ehsani, M., Saadatmanesh, H., & Fritz, W. (2007). Bending ductility of rectangular high strength concrete columns. *Engineering Structures - ENG STRUCT*, 29, 1783–1790. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.09.024>
- Zavvar Sabegh, M. H., Mirzazadeh, A., Salehian, S., & Wilhelm Weber, G. (2014). A Literature Review on the Fuzzy Control Chart; Classifications & Analysis. *International Journal of Supply and Operations Management*, 1(2), 167–189. <https://doi.org/10.22034/2014.2.03>
- Zhang, J., Cai, R., Li, C., & Liu, X. (2020). Seismic behavior of high-strength concrete columns reinforced with high-strength steel bars. *Engineering Structures*, 218, 110861. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110861>
- Zhang, X., Akber, M. Z., & Zheng, W. (2021). Prediction of seven-day compressive strength of field concrete. *Construction and Building Materials*, 305, 124604. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124604>
- Zhang, Y., Zheng, S., Rong, X., Dong, L., & Zheng, H. (2019). Seismic Performance of Reinforced Concrete Short Columns Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Applied Sciences*, 9(13). <https://doi.org/10.3390/app9132708>
- Zhou, X., & Liu, J. (2010). Seismic behavior and shear strength of tubed RC short columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(3), 385–397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.10.011>





# Journal of Turkish Operations Management

## Web of Science veri tabanında bibliyometrik bir araştırma: İş güvenliği makaleleri

Hatice Özdemir<sup>1\*</sup>, Ramazan Kayabaşı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mülkiyet Koruma Bölümü, Mustafa Çıkrıkçıoğlu Meslek Yüksekokulu, Kayseri Üniversitesi, Kayseri, Türkiye  
e-mail: haticeozdemir@kayseri.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-4449-2433>

<sup>2</sup>İnşaat Bölümü, Tomarza Mustafa Akıncıoğlu Meslek Yüksekokulu, Kayseri Üniversitesi, Kayseri, Türkiye  
e-mail: rkayabasi@kayseri.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-6195-7445>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 30.01.2023  
Revize: 23.05.2023  
Kabul: 26.04.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Bibliyometrik Analiz,  
İş Sağlığı ve Güvenliği,  
İş Güvenliği,  
Web of Science (WoS),  
Vosviewer

### Özet

Çalışanlar, çalışma alanlarında fiziksel, kimyasal, biyolojik, ergonomik ve psikososyal olmak üzere farklı tehlikelere maruz kalmakta ve istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Güvenli işyerleri tüm bu risk faktörlerinin ve kombinasyonlarının disiplinler arası bakış açısıyla yönetildiği işyerleridir. Bu araştırmada, “iş güvenliği” kavramına odaklanılmış olup Web of Science veri tabanında SCI, SSCI ve A&HCI atıf indeksleri içerisinde yer alan makalelerinin bibliyometrik özellikleri incelenmiştir. Analiz sonucunda iş güvenliği alanında 8.271 makale ile veri seti oluşturulmuş olup veriler tablolar ve şekiller biçiminde sunulmuştur. Anahtar kelimeler, ortak atıf yapılan dergiler, yazarlar ve kaynaklar arasındaki ilişkileri analiz etmek ve görselleştirmek için VOSviewer yazılımı kullanılmıştır. En fazla kullanılan anahtar kelime, alana ismini veren “iş güvenliği” kelimesidir. Bu alana toplam 24.410 yazarın katkı sağladığı ve makalelere 1.909 derginin kaynaklık yaptığı görülmüştür. En fazla yayın yapan ülkenin “ABD”, en fazla katkı yapan yazarın “Arcury”, en fazla makale yayınlanan derginin “SafetyScience” ve en etkin kurumun “Center for Disease Control Prevention” olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, iş güvenliği alanında yapılan çalışmaların ağ haritaları, anahtar kelimeler, yayınlar ve ilişkili konular güncel literatürle incelenmiştir.

## A bibliometric research in Web of Science database: Articles on occupational safety

### Article Info

#### ArticleHistory:

Received: 30.01.2023  
Revised: 23.05.2023  
Accepted: 26.04.2024

#### Keywords

Bibliometric analysis,  
Occupational health and safety,  
Occupational safety,  
Web of Science (WoS),  
VOSviewer

### Abstract

Employees are exposed to different hazards such as physical, chemical, biological, ergonomic and psychosocial in their work areas and undesirable results may occur. Safe workplaces are workplaces where all these risk factors and combinations are managed from an interdisciplinary perspective. In this research, the bibliometric features of the articles written in the field of occupational safety, which are included in the SCI, SSCI and A&HCI citation indexes in the Web of Science database, were examined. As a result of the analysis, a data set of 8,271 articles in the field of occupational safety was created and the data were presented in the form of tables and figures. VOSviewer software was used to analyze and visualize the relationships between keywords, commonly cited journals, authors, and sources. The most used keyword is the word "job security", which gives the field its name. It has been observed that a total of 24,410 authors contributed to this field and 1,909 journals were the source of the articles. It was determined that the country with the highest number of publications was “USA”, the author with the highest contribution was “Arcury”, the journal with the highest number of articles was “Safety Science” and the most effective institution was “Center for Disease Control Prevention”. In this study, the network maps, keywords, publications and related issues of the studies in the field of occupational safety were examined with the current literature.

## 1. Giriş

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) uğraşları, bütün çalışanların bedensel, ruhsal, sosyal iyilik durumlarını en üst düzeye çıkarmayı ve bu düzeyde tutmayı amaçlamaktadır. İşyerinde sağlıklı ve güvenli davranışı destekleyen, refahı kolaylaştıran, ekonomik güvenliği teşvik eden, iş ve çalışma ortamları oluşturmak adına en iyi bilgi ve pratiği bütünleştirecek disiplinler arası çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır (Banks, 2019). İSG'nin hem tıbbi boyutu (işçi sağlığı), hem teknik boyutu (iş güvenliği) hem de iş hijyeni boyutu bulunmaktadır (Yıldız ve Şahan, 2020). Bu bağlamda İSG, çok disiplinli kompleks yapıda bilimsel bir alan olup araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir (Chen, Hou, Zhang ve Li, 2020).

İSG'nin sağlanması; çalışanın yaşam ve beden bütünlüğünü korunması, işveren açısından verimliliği artırması, iş kazaları ve meslek hastalıklarının oluşturacağı işgücü kayıplarını ile doğrudan ve dolaylı maliyetleri önlenmesi açısından olumlu katkılar sunmaktadır (Sümer, 2018). İSG ilkelerinin uygulanması için tüm sosyal ve bilimsel disiplinlerin seferber edilmesi gerektiği gerçeği bu alanın karmaşıklığının da açık bir ölçütüdür (ILO, 2011). Uygulamada işyerlerinde geliştirilecek sürdürülebilir İSG politikaları belirleyici olmakla birlikte "ortam koşulları", "çalışma şartları" ve "çalışma ilişkileri" konunun kapsamını belirler. Ortam koşulları, fiziksel etkenler (radyasyon, gürültü, termal koşullar, yüksek basınç vb.), kimyasal etkenler (gazlar, ağır metaller, çözücüler vb.), tozlar (pamuk tozu, kenevir tozu, mantar sporları, organik tozlar, inorganik tozlar vb.), ergonomik etkenler (duruş ve oturuş, ağır yük taşıma vb.), biyolojik etkenler (bakteriler, virüsler, parazitler vb.), psikososyal etkenler (iş stresi, monoton iş, postalar halinde çalışma vb.) olarak gruplandırılabilir. İş yerinin yönetim şekli, ücret ve ödeme biçimi, özel politika gerektiren grupların koruma düzeyi, çalışma süresi ve bu sürenin nasıl organize edildiği, ayrımcılık, üretim sistemleri (bant tipi, takım, parça başı vb.) çalışma şartları arasında sıralanabilir. Çalışma ilişkileri bağlamında işbirliği ve katılım olanakları, söz ve karar sahibi olma düzeyi, açık iletişim örnek olarak sayılabilir (Yıldız ve Şahan, 2020).

Konunun sınırlarının bu kadar geniş olduğu bir alanda, disiplinler arası bir İSG yaklaşımı, hukuk (kamu politikası ve iş hukuku); iş tasarımı (mühendislik, ergonomi, yazılım ve otomasyon); araçlar (teknoloji, sağlık teknolojileri ve sensörler); çevre; fiziksel ve sosyal etkiler (kamu sağlığı, beslenme, fiziksel aktivite ve demografi); insan doğası (psikoloji, sosyoloji ve ekonomi), tıp ve sinir bilimi; iş örgütlenmesi ve ayrıca tasarımı ve insan kaynakları gibi disiplinleri bir araya getirmeyi amaçlayabilir (ILO, 2019) hatta bu durum bir mecburiyet olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer yandan Covid-19 pandemi döneminde yeniden şekillenen çalışma biçimleri, küresel göç, gelişen teknoloji ile birlikte bilgi ve iletişim teknolojilerinde yaşanan hızlı dönüşüm, akıllı sistemler, akıllı fabrikalar ve yapay zekâ gibi kavramlar; işverenleri, çalışanları, İSG profesyonellerini ve bu alana ilgi duyan tüm araştırmacıları mevcut İSG risklerinin yanında yeni riskleri tanımlamalarını, anlamalarını ve çözüm bulmalarını açısından da zorlamaktadır.

Farklı sektörlerde yürütülen farklı iş süreçlerine, ortam koşulları, çalışma şartları, çalışma ilişkilerine ve yeni teknolojilere rağmen İSG'nin omurgasını "iş güvenliği" ve "iş sağlığı" ana kavramları teşkil etmektedir. İSG bir yönüyle işçiyi, iş kazaları ve meslek hastalıkları gibi mesleki riskler karşısında korumaya yönelik teknik önlemleri, diğer yönüyle işçinin sağlık ve yaşamının korunmasına ilişkin sağlık önlemlerini kapsamaktadır (Sümer, 2018). Bu araştırma ile odaklandığımız temel kavram olan "iş güvenliği", işyerinde sadece işle ilgili yaralanmaların olmaması veya bir tehlikenin ortadan kaldırılması değildir; iş sisteminde ortaya çıkabilecek zarara karşı sistem seviyesinde oluşturulan koruma derecesidir (Carayon, ve diğ., 2015). Güvenlik biliminin kendisi, yalnızca "müspet" veya fizik bilimi ile değil, aynı zamanda insan bilimi ve davranışı ile bunların sınırsız değişkenliğini içeren sosyal ve psikolojik faktörlerle de ilgilenmektedir (Boustras ve Waring, 2020). İş güvenliği, işyerinde çalışanın sağlığını korumak, emniyetini sağlamak, işyerinin devamlılığı ile üretim süreçlerinde kaliteyi artırmak için uygulamada kendine yer bulurken literatürde ise birçok bilim insanı tarafından akademik olarak sosyal ve mühendislik alanlarında çalışmalara konu olmuştur. Yürütülen akademik çalışmalar, İSG alanının gelişmesini hızlandırdığı gibi uygulama alanlarında çalışanlara yol gösterici katkılar sunmaktadır.

Literatürde araştırmacılar tarafından bibliyometrik çalışmaların, farklı farklı alanlarda yürütülen bilimsel araştırmaları analiz etmek üzere sıkça kullanıldığı görülmektedir. Bibliyometrik analiz, büyük hacimdeki akademik literatürü mikroskobik genel bir bakış açısıyla görmeyi mümkün kılan bir tekniktir (Van Nunen, Li, Reniers ve Ponnet, 2018). Bu nedenle iyi yapılmış bibliyometrik çalışmalar, bir alanı yeni ve anlamlı şekillerle iletirmek için sağlam temeller oluşturduğu gibi tek elden genel bir bakış açısı sunmakta, açık noktaları tanımlamakta ve inceleme için yeni fikirler ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey ve Lim, 2021). Bu çalışma kapsamında amaçlanan, iş güvenliği alanında yazılan makalelerin kapsamlı bir incelemesini yapmak ve konunun zaman içerisindeki gelişimini anlayarak gelecekte yapılacak çalışmalar için bir çerçeve oluşturmaktır. Dolayısıyla bu araştırmadan elde edilecek bulguların iş güvenliği alanında araştırma yapmak isteyenlere faydalı olacağı düşünülmektedir.

## 2. Bilimsel yazın taraması

Literatürde iş güvenliğine ilişkin farklı konuları, bibliyometrik analiz ile inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Li ve Hale (2015) tarafından yürütülen çalışmada, güvenlik araştırmalarının yer aldığı dergiler belirlenerek, dergiler arasındaki bilgi iletişimi analiz edilmiştir (Li ve Hale, 2015). Bir diğer çalışma da, “Bibliometric analysis of safety culture research” başlıklı makale olup Web of Science (WoS) veri tabanında güvenlik kültürü ile ilgili 1900 ile 2015 yılları arasında yayınlanan toplam 1.789 yayın incelenmiştir (Van Nunen, Li, Reniers ve Ponnet, 2018). Makalede, araştırma sonucunda güvenlik kültürü alanında iki ana alanının öne çıktığı görülmüş olup bu alanlar: (1) örgütsel güvenlik kültürü ve (2) sağlık bakımı ve hasta güvenliği kültürüdür. Bibliyometrik analiz yöntemi kullanılan bir başka çalışma, Safety Science dergisinin 1976-2016 yılları arasında yayınladığı, 2.902 makalenin incelendiği çalışmadır. Araştırmacılar, derginin önde gelen eğilimlerini; konular, yazarlar, üniversiteler ve ülkeler açısından incelerken, aynı zamanda ortak alıntılar, bibliyografik bağlantılar, ortak yazarlar ve anahtar kelimelerin birlikte oluşumuna da odaklanmıştır (Merigó, Miranda, Modak, Boustras ve Sotta, 2019).

İş güvenliği alanında, iş kolları bazında inşaat sektörünün öne çıktığı görülmüştür. İş güvenliği ile inşaat sektörünü birlikte ele alan çalışmadan biri, Newaz, Ershadi, Jefferies, Pillay ve Davis (2022)' in yapmış olduğu ve 180 makalenin analiz edildiği çalışmadır. Çalışma, güvenlik yönetimi için ileri teknoloji uygulamalarına yönelik ilginin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Zeng ve Li (2022) çalışmalarında, inşaatlarda bulunan tehlikelerin farkındalığı bakımından, akademik camia ile sıradan insanları karşılaştırmıştır. Makale, 1991 ile 2021 yılları arasında inşaat tehlikeleri ve iş güvenliği bilincine sahip Weibo postaları ile WoS' da indekslenen 769 makalenin analizini içermektedir. Sonuçlar, inşaat sektöründe akademi dünyasının yapay zekâ gibi yüksek teknolojiye odaklanırken, Weibo'da çökme, deprem, güvenlik yönetimi, risk yönetimi vb. konuların öne çıktığını göstermiştir. İnşaat sektörüne ilişkin bir diğer çalışma, Vijayakumar ve Choi (2022) tarafından yapılmış olup, inşaat sektöründe ergonomik risk değerlendirmesine ilişkin WoS veri tabanından elde edilen 330 makale kullanılarak bibliyometrik veriler analiz edilmiş ve bulunan sonuçlar tartışılmıştır.

Geçmiş İSG sorunlarını anlamak, bugünkü İSG sorunlarını yönetmek ve geleceğe yönelik İSG stratejilerini geliştirmek ve planlamak için alanla ilgili veri toplamak, önemli bir ihtiyaçtır (Palaz, 2019). Bu ihtiyaçtan yola çıkarak bu çalışma, İSG'nin ana bileşenlerinden “iş güvenliği” kavramı mercek altına almış ve bibliyometrik özelliklerini araştırmıştır. 1980'li yıllardan itibaren hızla artan bibliyometri ile ilgili araştırmalar; önceleri matematikçilerin, enformatikçilerin ve sosyologların uğraş alanı olmuş, zamanla özellikle bilişim teknolojilerinin hızla yaygınlaşmasıyla birlikte kütüphanecilerin konuya ilgisi artmıştır (Karasözen, Bayram ve Zan, 2009). Günümüzde ise bibliyometrinin kullanımı giderek tüm disiplinlere yayılmaktadır (Aria ve Cuccurullo, 2017). Bibliometrics terimi, Alan Pritchard tarafından 1969'da yayınlanan Statistical Bibliography veya Bibliometrics başlıklı bir makalede ortaya atılmıştır (Das ve Saha, 2014). Bibliyometri çok farklı bağlamlarda kullanılan analitik bir araçtır (Ellegaard, 2018). Türkiye Bilimsel ve Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) bibliyometriyi; “belirli bir alanda belirli bir dönemde ve belirli bir bölgede kişiler ya da kurumlar tarafından üretilmiş yayınların ve bu yayınlar arasındaki ilişkilerin sayısal olarak analizi” olarak tanımlanmaktadır (TÜBİTAK, 2023). Bibliyometrik yöntemler yazarların, dergilerin, ülkelerin ve enstitülerin performansını ve araştırma modellerini değerlendirmek, aralarındaki işbirliği modellerini belirlemek ve ölçmek için kullanılabilir (Nunen, Li, Reniers ve Ponnet, 2018). Bibliyometrik analizin ana avantajı, araştırma alanının genel resmini sunmasıdır ki büyük hacimli yapılandırılmamış verileri titiz yollarla anlamlandırarak, köklü alanların kümülatif bilimsel bilgisini ve zamanla gelişen nüanslarını deşifre etmek ve haritalamak için yararlıdır (Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey ve Lim, 2021; Merig ve Yang, 2017).

Temel amacımız, bibliyometrik analize dayalı olarak iş güvenliği ile ilişkili yayınlanan akademik çalışmaların genel özelliklerini ve eğilimlerini belirlemektir. WoSCore Collection üzerinden listelenen makaleler, özellikle konunun uluslararası literatürde nasıl tartışıldığını ve ne yöne doğru yönlendiğini göstermesi açısından önemlidir. Bu araştırma sonucunda ortaya çıkacak bilgilerin, İSG alanıyla ilgilenen akademisyenlere ve uzmanlara gelecekte yapacakları araştırmalar için yol gösterici olması beklenmektedir. Gerçekleştirilen analizler aracılığıyla, WoSCore Koleksiyonunda yer alan ve iş güvenliği alanı ile sınırlanmış bir çerçevede aşağıda verilen sorulara yanıt aranmıştır:

1. İş güvenliği alanında yayınlanan makalelerin genel tanımlayıcı özellikleri nelerdir?
2. İş güvenliği alanında yayınlanan makalelerin bilimsel haritalama ile ortaya çıkan bağlantıların ve kümelerin özellikleri nelerdir?
3. İş güvenliği alanındaki en önemli konular nelerdir?
4. Gelecekteki araştırmaların iş güvenliği bağlamında eğilimleri ne yöndedir?



### 3.Yöntem

#### 3.1 Veri kaynakları

Araştırmanın ilk aşamasında yapılan ön çalışma ile anahtar kelimeler belirlenmiş ve bu anahtar kelimeler araştırmaya yol gösterici olmuştur. WoS veri tabanında (“occupational health and safety” OR “occupational safety and health” OR “iş sağlığı” OR “iş güvenliği”) anahtar kelimeleri ile 1975-2019 yıl aralığı için yapılan ön araştırma sonucunda 16.607 makaleye ulaşılmıştır. Yapılan ön araştırmada sırasıyla “occupational health (3732)”, “occupational safety (560) ve “occupational health and safety (533)” ve “safety (310) kullanma sıklığı en yüksek ilk dört anahtar kelimedir. Kiran (2021)’de yapmış olduğu çalışmada, iş sağlığı ile ilgili makaleleri, anahtar kelimeler bağlamında analiz etmiş ve en sık başvurulan anahtar kelimelerin sırasıyla “iş sağlığı” ve “iş güvenliği” olduğunu ifade etmiştir. Ön araştırmanın ardından yazarlar tarafından “occupational safety” odaklanılmak istenilen veri kaynağı olarak belirlenmiştir.

Bibliyometrik çalışmalarda kilit noktalardan birisi kullanılacak veri tabanıdır. Sıklıkla kullanılan Scopus, WoS ve Google Scholar gibi farklı veri tabanlarının birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar, Scopus ve WoS veri tabanlarının ölçülen çıktılar arasındaki korelasyonların oldukça güçlü olduğu (Archambault, Campbell, Gingras ve Larivière, 2009), Scopus’ un anahtar kelime ve alıntı analizinde daha geniş bir dergi yelpazesini kapsadığı ancak WoS ile karşılaştırıldığında 1995’ten sonra yayınlanan makalelerle sınırlı olduğunu (Falagas, Pitsouni, Malietzis ve Pappas, 2008) göstermiştir. Aynı zamanda analiz sırasındaki potansiyel insan hatalarının azaltılması için uygun farklı veri tabanlarındaki bilgileri birleştirmek yerine bir veri tabanına karar vermenin tavsiye edildiği (Naveen , Satish , Mukherjee, Pandey ve Lim, 2021) çalışmalara rastlanmıştır. WoS veri tabanının, akademisyenlerin performansını ölçmek için "altın standart" veri tabanı olarak kabul edilmesi, Academic Ranking of World Universities ve Times Higher Education World University sıralaması gibi birçok uluslararası sıralamada kullanılıyor olması (Maseda, Iturralde, Cooper ve Aparicio, 2022) veri tabanı seçiminde etkili olmuştur. WoSCore Collection, WoS platformundaki sistemli ve bilimsel araştırmalar için orijinal atıf dizini Clarivate (2022) olup araştırma verileri, Science Citation Index (SCI) ve Social Science Citation Index (SSCI) kaynaklı yayımlara odaklanan WoSCore Collection'dan 02.09.2022’de Kayseri Üniversitesi kütüphanesi aracılığıyla elde edilmiştir.

WoS veri tabanında arama yapılırken “TS = (“occupational safety”) OR TS = (“work\* safety”) Languages = ‘All languages’ Document types = ‘All document types’ Time span = ‘All year’ Database = Science Citation Index Expanded (SCI-Expanded) and Social Sciences Citation Index (SSCI) in WoSCore Collection” kriterleri kullanılmıştır. İlk arama sonucunda 9.599 araştırmaya ulaşılmıştır. Ardından belge türü için filtre uygulanmış bildiriler, inceleme, editör yal materyal, bildiri özeti, kitap incelemesi, mektup, not, haber, düzeltme vb. kapsam dışında tutularak sadece makaleler kullanılmıştır. Yıl için herhangi bir filtre kullanılmamıştır. Bunun nedeni çalışmaların zaman aralığının net olarak bilinmemesi ve en erken yayınlanan araştırmaları da kapsayacak sonuçlara ulaşmak istenmesidir. Tarama sonucunda, 1980 yılı öncesinde iş güvenliğine ait literatürde herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı için araştırma 1980-2022 yılları arasında kalan dönemi kapsamaktadır.

Sonuç olarak nihai veri seti “iş güvenliği” alanında 1980-2022 yılları arasında WoS veri tabanında dizinlenen ve daha geniş bibliyometrik analiz için “.txt” dosyasına kaydedilen 8.271 belgeden oluşmaktadır. Belgelerin başlıklarında ve analiz sırasında kullanılan diğer verilerde yazım hatalarının olmadığı kabul edilmiştir.

#### 3.2 Veri analizi

İş güvenliği literatüründe elde edilen veri setini değerlendirmek üzere bibliyometrik analiz yöntemi kullanılmıştır. Bibliyometrik analiz teknikleri performans analizi ve bilimsel haritalama ile iki kategoride kendini göstermektedir. Özünde, performans analizi araştırma bileşenlerinin katkılarını açıklarken, bilimsel haritalama araştırma bileşenleri arasındaki ilişkilere odaklanmaktadır (Donthu, Kumar, Mukherjee, Pandey ve Lim, 2021). WoS veri tabanında dizinlenen ve 1980-2022 yılları arasında makale olarak yazılan toplam 8.271 yayın performans analizi için Excel ve bibliyometrik ağ verilerini haritalamak için VOSviewer (1.6.18) kullanılmıştır. VOSviewer, bilimsel koleksiyonların alıntı ağlarını analiz etmek ve görselleştirmek için Van Eck ve Waltman tarafından tasarlanmış ücretsiz Java uygulamasıdır. Uygulama bibliyometrik haritaların grafik gösterimini ele alır ve özellikle büyük bibliyometrik haritaların yorumlanmasını sağlamaktadır (Massimo ve Cuccurullo, 2017).

#### 3.3 Sınırlılıklar

Araştırma 02.09.2022 tarihinde WoSCore Koleksiyonunda yer alan makalelerle sınırlı olup sadece yayınlanmış makaleler dikkate alınmıştır. Bildiriler, editöryal materyal, kitap bölümleri, toplantı özeti, mektup, kitap özeti, not, düzeltme, bibliyografya vb. araştırmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Ayrıca, arama kriterleri her ne kadar

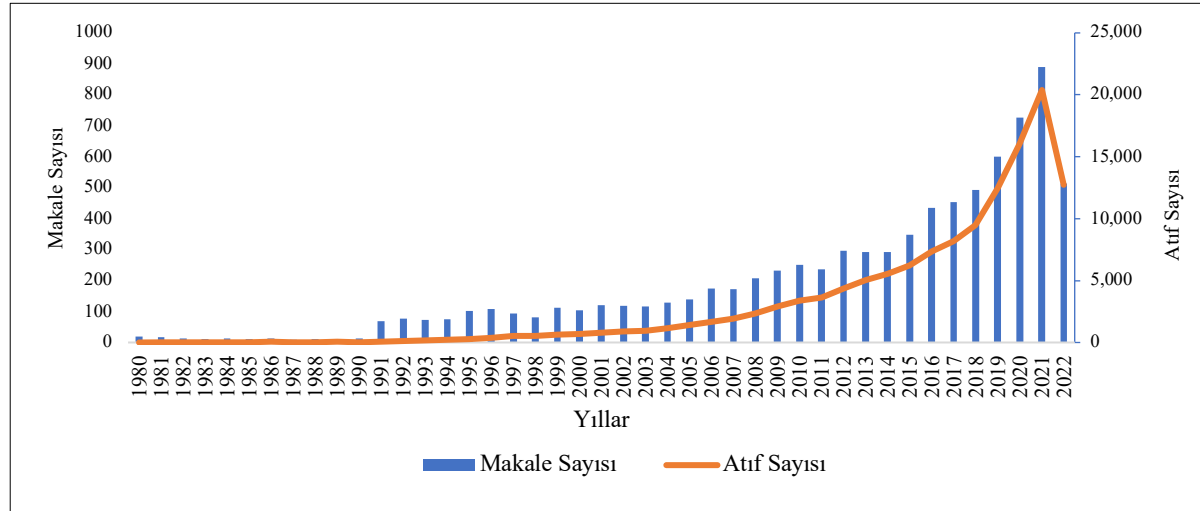
çalışmaların konusunu tanımlasa da, her yayının tamamen alakalı olduğunu garanti edemeyebilir. Bununla birlikte, bu araştırmanın İSG alanındaki genel durumu ve genel eğilimi tanımlamak için kullanılabilir olduğu düşünülmektedir.

#### 4. Bulgular

Bu bölümde 8.271 makale üzerinden elde edilen bulgular alanda yürütülen çalışmaların genel tanımlayıcı özelliklerini (yıl, ülke, yazar, dergi, araştırma alanları, atıf sayıları vb.) ve bilimsel haritalama ile ortaya çıkarılan bağlantı ve kümeleri (anahtar kelime, ülke, yazar, kurum vb) içerecek şekilde sunulmaktadır.

##### 4.1 Performans analizi

Bu bölümde birinci araştırma sorusuna ait sonuçlara yer verilmiştir. Şekil 1’de 1980 ile Eylül 2022 tarihleri arasında yayınlanan iş güvenliği alanındaki makalelerin ve yapılan atıfların yıllara göre dağılımı yer almaktadır. 1980 yılı iş güvenliği alanında WoS veri tabanında ilk makalenin indekslendiği yıl olup aynı yıl içerisinde toplam 19 makale yayınlanmıştır. 1990’lı yılların sonlarından itibaren alana olan ilgi artmaktadır. 7.340 makale ile makalelerin %88,7’si 2000 yılından sonra yayınlanmıştır. 1976 yılında yaşanan Seveso’da dioksin sızıntısı, 1984 yılında Bhopal’da pestisit fabrikasından sızan siyan gazı ve 1986 yılında Çernobil’de nükleer reaktör kazası gibi yaşanan büyük endüstriyel kazalar; insanlar, ekonomi ve çevre üzerinde önemli etkiler bırakmıştır. Bu kazalar, bir taraftan güvenliğin, kurulan sistemlerin ve uygulanan standartların sorgulanmasına yol açarken diğer taraftan her disiplinden araştırmacıların ilgisini alana çekmiştir.



Şekil 1. Makale ve atıfların yıllara göre dağılımı (1980-2022)

İş güvenliği alanında literatüre en fazla katkı yapan ilk on ülke Tablo1’de yer almaktadır. Konu ile ilgili toplam 141 ülke alana katkı sağlamıştır.

Tablo 1. İş güvenliği literatürüne katkı sağlayan ilk 10 ülke

No	Ülke Adı	Makale sayısı	Yüzde (%)
1	USA	3.781	45.71
2	China	575	6.95
3	Germany	489	5.91
4	Canada	467	5.65
5	Australia	388	4.69
6	Italy	344	4.16
7	South Korea	330	3.99
8	England	298	3.60
9	Türkiye	177	2.14
10	Spain	174	2.10

Alana %45,71 en fazla katkıyı sunan ülke, 3.781 makale ile ABD'dir. Çin %6,95 ve 575 makale ile ikinci sırada yer alırken, Almanya %5,91 ve 489 makale ile 3. sırada yer almaktadır. İş güvenliği alanında yayın sayısına göre en fazla katkı sağlayan yazarlar ve onlara ait makale sayıları Tablo 2 de verilmiştir.

**Tablo 2.** İş güvenliği alanında yayın sayısına göre en etkili 10 araştırmacı

No	Yazar	Makale Sayısı	Yüzde (%)
1	Arcury, T.A.	36	0.435
2	Quandt, S.A.	33	0.399
3	Iavicoli, S.	32	0.387
4	Lee, J.	32	0.387
5	Lee, S.	31	0.375
6	Park, J.	25	0.302
7	Schulte, P.A.	25	0.302
8	Breuer, D.	24	0.290
9	Sorensen, G.	24	0.290
10	Li, J.	23	0.278

Tablo 2'ye göre iş güvenliği alanında en fazla katkı yapan yazarların "Arcury, T.A." (36 makale), "Quandt, S.A." (33 makale), "Iavicoli, S." (32 makale) ve "Lee, J." (32 makale) olduğu görülmektedir. İş güvenliği alanında literatüre en fazla katkı yapan ilk 10 organizasyon Tablo 3'de verilmiştir. Alana en fazla katkıyı %10,54 ile sunan organizasyon ABD Sağlık ve İnsan Hizmetleri Bakanlığı'na bağlı Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi 872 makale ile (Centers for Disease Control Prevention) olduğu görülür. İkinci sırada %10,02 ve 829 makale ile ABD Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezi (Centers for Disease Control Prevention)'ne bağlı Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü (National Institute for Occupational Safety Health-NIOSH) yer almaktadır. Üçüncü sırada 183 makale ile Kaliforniya Üniversitesi (University Of California System) %2,21 bulunmaktadır. En üretken kurumların 7 tanesi üniversite iken biri dışında tamamı ABD'de bulunmaktadır.

**Tablo 3.** İş güvenliği alanında etkin ilk 10 kurum

No	Kurum Adı	Ülke	Makale Sayısı	Yüzde (%)
1	Centers for Disease Control Prevention USA	ABD	872	10.54
2	National Institute for Occupational Safety Health Niosh	ABD	829	10.02
3	University of California System	ABD	183	2.21
4	University of North Carolina	ABD	149	1.80
5	Harvard University	ABD	128	1.55
6	University of Toronto	Kanada	118	1.43
7	Pennsylvania Common wealth System of Higher Education Pcshe	ABD	99	1.20
8	University of Texas System	ABD	99	1.20
9	State University System of Florida	ABD	93	1.12
10	Johns Hopkins University	ABD	82	0.99

İş güvenliği alanında yayınlanan makaleler için yapıldığı araştırma alanlarının ilk 10'u Tablo 4'de verilmiştir. "Public Environmental Occupational Health" alanı %41,02 ile ilk sırada yer almaktadır. Bu alanı %25,91 ile Engineering, %17,65 ile Environmental Sciences Ecology alanı takip etmektedir.

**Tablo 4.** İş güvenliği alanına yönelik yapılan taramada ilk 10 WoS Kategorisi

No	Araştırma Alanı	Makale Sayısı	Yüzde (%)
1	Public Environmental Occupational Health	3393	41.02
2	Engineering	2143	25.91
3	Environmental Sciences Ecology	1460	17.65
4	Operations Research Management Science	503	6.08
5	Business Economics	403	4.87
6	Psychology	346	4.18
7	Toxicology	339	4.10
8	Social Sciences Other Topics	336	4.06

9	Transportation	289	3.49
10	Science Technology Other Topics	240	2.90

Bilimsel dergiler, çeşitli başlıklarda ve bilimsel öneme sahip konularda kaliteli içerikler yayınlar ve araştırmacılar ve diğer literatür kullanıcıları için çok önemlidir (Wani, Akhter ve Musthtaq, 2021). Literatüre iş güvenliği alanında en fazla katkı yapan dergiler araştırılmış ve ilk 10 dergi Tablo 5’de verilmiştir. Buna göre %5,49 ve 454 makale ile Hollanda menşeli “Safety Science” ilk sırada bulunmaktadır. İkinci sırada %4,73 ve 391 makale ile “Safety and Health at Work” üç ayda bir yayınlanan uluslararası, hakemli, disiplinler arası Kore menşeli bir dergidir. Üçüncü sırada %3,14 ve 260 makale ile “American Journal of Industrial Medicine” olup aylık hakemli tıbbi dergidir. Journal impact factor; akademik dergilerin değerine ve araştırmacıların kariyer beklentilerine bağlı önemli bir ölçüt (Kyle ve Larivière, 2022) olup bir dergide son yıllarda çıkan yayınlara yapılan ortalama atıf sayısının bir ölçüsüdür (Tonta, 2017). Bir derginin etki faktörü önceki iki yılda yayımlanan makalelerin, hesaplandığı yıl içinde almış olduğu atıf sayısının, aynı iki yıl içerisinde yayımlanan makalelerin ve inceleme çalışmalarının sayısına oranı ile hesaplanmaktadır (Yalçın, Yavuz ve Dibek, 2015). Tablo 5’de yer alan dergi etki faktörleri dikkate alındığında en yüksek etki faktörüne sahip dergi 6.392 ile “Safety Science”dır.

**Tablo 5.** İş güvenliği alanında yayın yapan ilk 10 dergi

No	Dergi Adı	Makale Sayısı	Yüzde(%)	Etki Faktörü (Impact Factor) 2021*
1	Safety Science	454	5.49	6.392
2	Safety and Health At Work	391	4.72	4.045
3	American Journal of Industrial Medicine	260	3.14	3.079
4	International Journalof Environmental Research and Public Health	211	2.55	4.614
5	Journal of Occupational and Environmental Hygiene	199	2.41	3.359
6	Journal of Occupational and Environmental Medicine	178	2.15	2.306
7	Journalof Safety Research	165	1.99	4.264
8	International Journalof Occupational Safety and Ergonomics	147	1.78	2.665
9	American Industrial Hygiene Assocation Journal	121	1.46	Yer almıyor
10	Gefahrstoffe Reinhaltung Der Luft	115	1.39	0.158

\*Dergi etki faktörleri, “WoS Journal Information” sayfasında yer alan verilerden alınmıştır.

En sık atıf yapılan ve alana yön verdiği düşünülen ilk 10 makale Tablo 6’da yer almaktadır. Bilimsel bilgi üretimi sürecinin önemli ürünleri sayılan makalelerin ‘değer’e dönüştüğüne ilişkin temel göstergeler; öncelikle okunması ve yararlanması, ardından bilginin birikimli ilerlemesi ilkesi ile mümkün olduğunca atıf almasıdır (Tamdoğan, 2009). Atıf analizinde, en çok alıntı yapılan eserler, bir disiplini yönlendiren temel kavramları açığa kavuştururken en çok alıntı yapılan yazarlar, alanı kimin şekillendirdiği konusunda araştırmacılara bilgi vermektedir (Kim, Kang ve Lee, 2021). En fazla atıf alan makaleler incelendiğinde ilk sırada Birch ve Cary’nin Aerosol Science and Technology dergisinde 1996 yılında yayınlanan “Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposrest oparticul atediesel exhaust” başlıklı makalesi olduğu görülür (Birch ve Cary, 1996). Yazarlar bu makalede, dizel egzozuna maruziyeti ve sonuçlarını tartışırken toplam atıf sayısı 1.407’dir. En çok atıf alan 10 yayın incelendiğinde beş makalenin güvenlik iklimi ve ilişkili kavramlar üzerine olduğu aynı zamanda en fazla atıfta bulunan derginin “Journal of Applied Psychology” olduğu görülmektedir. Yazarlar yayımlanan makalelerinde; güvenlik ikliminin farklı boyutları ile güvenlik performansı arasındaki ilişkiyi (Nahrgang, Morgeson ve Hofmann, 2011; Neal ve Griffin, 2006) ve dönüşümcü liderlik kavramı ile mesleki yaralanmaların ilişkilendirildiği bir modeli (Barling, Loughlin ve Kelloway, 2002) incelemiştir. Makalelerin en sık yayımlandığı dergiler ile en fazla atıf alan makalelerin yer aldığı dergilere ait tablolar incelendiğinde “Safety Science” ve “American Journal of Industrial Medicine” her iki tabloda da bulunan ortak dergiler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Tablo 6. İş güvenliği alanında en sık alıntı yapılan ilk 10 makale

N o	Makale Başlığı	Yazarlar	Dergi Adı	Yayı m Yılı	Atf Sayısı
1	Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposure to particulate diesel exhaust	Birch, ME; Cary, RA	Aerosol Science and Technology	1996	1407
2	A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels	Neal, Andrew; Griffin, Mark A.	Journal Of Applied Psychology	2006	832
3	Safety at Work: A Meta-Analytic Investigation of the Link Between Job Demands, Job Resources, Burnout, Engagement, and Safety Outcomes	Nahrgang, Jennifer D.; Morgeson, Frederick P.; Hofmann, David A.	Journal Of Applied Psychology	2011	824
4	Comparison of Improved and NIOSH carbon measurements	Chow, JC; Watson, JG; Crow, D; Lowenthal, DH; Merrifield, T	Aerosol Science and Technology	2001	714
5	Willingness to pay for a quality-adjusted life year: In search of a standard	Hirth, RA; Chernew, ME; Miller, E; Fendrick, AM; Weisert, WG	Medical Decision Making	2000	668
6	Development and test of a model linking safety-specific transformational leadership and occupational safety	Barling, J; Loughlin, C; Kelloway, EK	Journal Of Applied Psychology	2002	592
7	Contributing factors in construction accidents	Haslam, RA; Hide, SA; Gibb, AGF; Gyi, DE; Pavitt, T; Atkinson, S; Duff, AR	Applied Ergonomics	2005	543
8	The global burden of occupational noise-induced hearing loss	Nelson, DI; Nelson, RY; Concha-Barrientos, M; Fingerhut, M	American Journal Of Industrial Medicine	2005	542
9	The relationship between safety climate and safety performance: A meta-analytic review	Clarke, Sharon	Journal Of Occupational Health Psychology	2006	528
10	Safety climate, safety management practice and safety performance in off shore environments	Mearns, K; Whitaker, SM; Flin, R	Safety Science	2003	443

## 4.2 Bilimsel haritalama

### 4.2.1 Anahtar kelime ağ analizi

Anahtar kelimeler, makalenin odaklandığı ana fikri ve (Ali, Park ve Chae, 2019) konu içeriğini yansıtarak içerik için önemli açıklamalarda bulunan kelime veya terimlerdir (Ma, 2022). Yazarın makalelerinde bulunan en önemli üç ila beş (ya da daha fazla) kelime hakkındaki düşüncelerini temsil ederken aynı zamanda en popüler araştırma konuları ile bunların zaman içinde değişimleri hakkındaki sorulara cevap vermektedir (Pesta, Fuerst ve

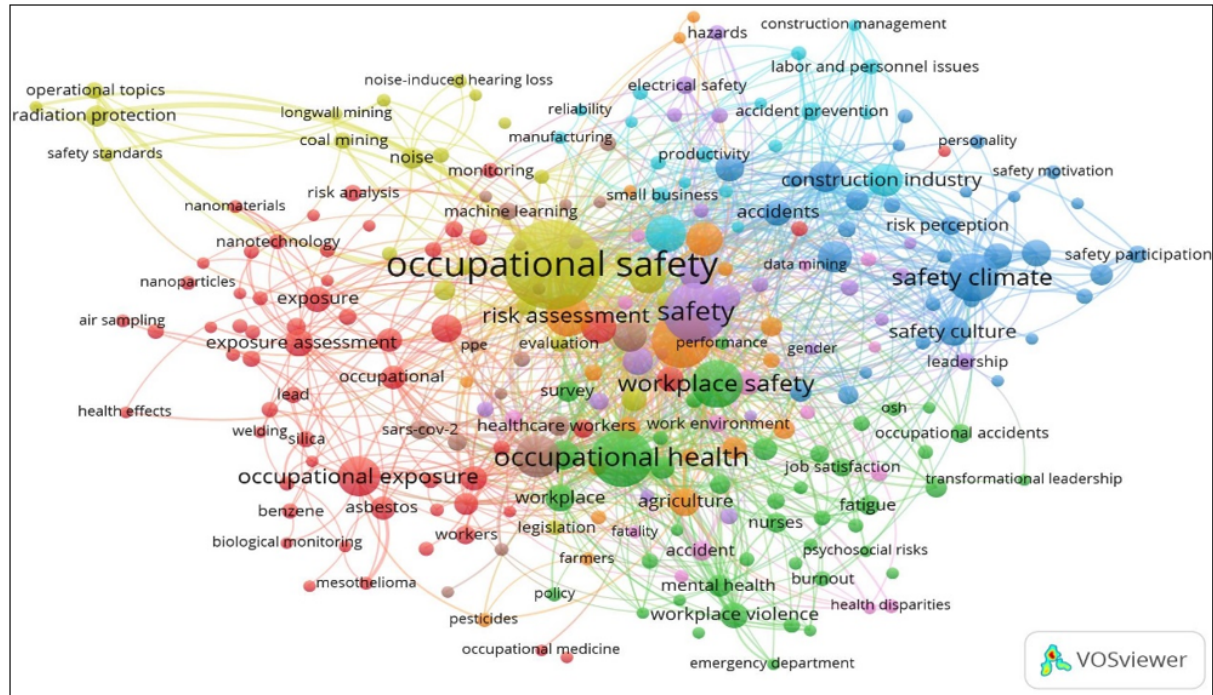
Kirkegaard, 2018). WoS veri tabanında iş güvenliği alanına odaklanan 8.271 makale ile 17.090 anahtar kelimeye ulaşılmış ve VOSviewer (1.6.18) programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Tablo 7’de kullanım sıklığına göre sıralanmış anahtar kelimeler içerisinde kullanım sıklığı ve bağlantı gücü (link strength) en yüksek kelime “occupational safety” anahtar kelimesidir. Bunu “safety” ve “occupational health” takip etmektedir. İş güvenliği araştırmaların iş sağlığı araştırmaları ile güçlü bir bağ kurduğu, listede yer alan “occupational health”, “covid-19”, “occupational exposure”, “occupational health and safety” ve “ergonomics” gibi anahtar kelimelerinden anlaşılmaktadır.

**Tablo 7.** Kullanma sıklığı en yüksek 20 anahtar kelime

No	AnahtarKelime	Kullanım Sıklığı	Toplam Bağlantı Gücü	No	Anahtar Kelime	Kullanım Sıklığı	Toplam Bağlantı Gücü
1	Occupational safety	702	919	11	Ergonomics	102	135
2	Safety	310	568	12	Occupational health and safety	102	106
3	Occupational health	285	446	13	Work safety	99	98
4	Occupational safety and health	268	317	14	Construction industry	95	180
5	Workplace safety	206	239	15	Safety management	92	160
6	Safety climate	203	331	16	Worker safety	86	86
7	Covid-19	160	244	17	Construction safety	85	116
8	Risk assessment	158	213	18	Safety culture	77	139
9	Occupational exposure	138	124	19	Prevention	74	141
10	Construction	122	212	20	Agriculture	71	126

Anahtar kelimelerin ağ haritasını oluşturmak için, 17.090 anahtar kelime en az 12 makalelerde kullanılmış olma şartı ile sınıflanmış olup toplam 254 kelime, 9 küme ve 3.775 bağlantıya ulaşılmıştır (Şekil 2). Birlikte kullanılan anahtar kelimeler aynı renkli kümelerde yer almaktadır. Bağlantı gücü (link strength), iki kavram arasındaki ortak kullanım gücünü temsil etmekte olup sayı ne kadar yüksekse iki kavram arasındaki ilişki o kadar güçlüdür (Çoşkun ve Tabak, 2017) ve düğümler kelimenin kullanım sayısına göre büyümektedir. Verilen ağ haritalarında bağlantı gücü yüksek olan kelimeler arasındaki çizgiler kalınlaşmaktadır.



**Şekil 2.** Makalelerde geçen ortak anahtar kelime ağ haritası

Aynı renkli kümelerde yer alan kelimeler sıklıkla birlikte kullanılan kelimelerdir. Haritada 9 küme bulunmaktadır (Tablo 8). Tüm ağın en etkin ve bağlantı gücü yüksek düğümü “occupational safety” sarı kümede olup diğer tüm kümelerden farklı kelimelerle bağlantı halindedir. “occupational safety”nin öne çıkan anahtar kelime listesinde yer alan iki kelime ile (occupational exposure ve occupational safety and health) ile herhangi bir bağlantıya sahip değildir. Tahminlerimizi de doğrulayacak biçimde dâhil edilen 254 kelime arasında “occupational health” kelimesi “occupational safety” ile en yüksek bağlantı gücüne sahip anahtar kelimedir.

**Tablo 8.** Öne çıkan anahtar kelimelerin kümelere göre dağılımı

No	Küme Rengi	Düğüm Sayısı	Öne çıkan anahtar kelimeler	Diğer anahtar kelimelerle olan bağlantı sayısı	“Occupational safety” anahtar kelimesinin diğer kelimelerle olan bağlantı gücü
1	Sarı	25	Occupational safety	209	-
2	Mor	23	Safety	161	10
3	Yeşil	43	Occupational health	150	57
4	Turuncu	20	Occupational safety and health	143	-
5	Mavi	32	Safety climate	96	21
6	Kırmızı	59	Occupational exposure	64	-
7	Kahverengi	17	Covid-19	86	11
8	Turkuaz	20	Construction	95	14
9	Pembe	15	Occupational injuries	61	6

Kırmızı küme en fazla düğümün olduğu küme olup kahverengi küme ile yan yana konumlanmıştır. Kırmızı kümede toz, meslek hastalıkları, maruziyet ve önlemleri işaret eden kelimeler karşımıza çıkmaktadır. Kahverengi küme covid-19, pandemi ve çalışma hayatına ilişkin kavramlar yer almaktadır. Yeşil küme en güçlü üçüncü kelime olan “iş sağlığı” kelimesinin olduğu küme olup “iş güvenliği” ile çok güçlü bir bağlantısı vardır. İşyerinde şiddet, önleme, akıl sağlığı, hastane, hemşire, hasta sağlığı gibi kelimeler özellikle sağlık sektörünün ve sağlık çalışanlarının farklı boyutları ile ele alındığı çalışmaları akla getirmektedir. Mavi kümede iş güvenliğinin “yönetim” boyutuyla ilişkili kavramlar göze çarpmaktadır. Güvenlik iklimi ve güvenlik kültürünün farklı boyutlarıyla ilişkilendireceğimiz (güvenlik liderliği, güvenlik iletişimi, güvenlik katılımı, motivasyon vb.) konular yer almaktadır. Risk, mesleki yaralanma, eğitim kelimelerinin öne çıktığı mor kümenin kelimeleri diğer kümelerin içerisine dağılmış bir görüntü çizmektedir. Bu alanda herhangi bir konuda çalışma yapan araştırmacıların bu kelimeyi sıklıkla tercih ettikleri söylenebilir. Turkuaz kümede inşaat sektörünün iç dinamiklerine ilişkin konular göze çarpmaktadır. Çok tehlikeli sınıfta yer alan ve içerisinde çok fazla risk barındıran sektör, ayrı bir küme oluşturarak alana olan ilgiyi işaret etmektedir. Turuncu renkli küme ağ haritasının ortasında “iş güvenliği ve sağlığı” kelimesi ile yer almaktadır. Bu küme ergonomi, kas iskelet sistemi hastalıkları, biyomekanik, bel ağrısı kavramlarını içinde barındırmaktadır. Ayrıca kümede “risk analizi” kelimesi de dikkat çekicidir. Bu küme için işyerlerinde ergonomik risk analizinin araştırmacıların ilgisini çektiğini göstermektedir. Pembe küme en az kelime grubuna ve en az etkileşime sahip olup diğer kümelerin içerilerine yerleşmiş dağınık bir görüntü çizmektedir. Mesleki yaralanma ve kaza kelimeleri öne çıkmakta olup diğer kümelerde baskın anahtar kelimelerle kullanılabilecek yardımcı kelimelerdir.

Anahtar kelimelerin yıllar içerisinde değişimi Şekil 3’te yer almaktadır. Kullanılan terimler sıcak renklere yakınsadığı zaman son yıllarda yazarlar tarafından araştırılmaya başlandığı, soğuk renklere yakınsadıkça da geçmiş yıllarda yürütülen çalışmaları işaret ettiği anlaşılmaktadır. Konunun çalışılmaya başladığı dönemde “occupational exposure” kümesi ağırlıklı çalışmalar dikkat çekmektedir. Gürültü, işitme kaybı, formal dehit maruziyeti, asbest, benzen, radyasyon, havalandırma vb. çalışma alanları olarak sayılabilir. 2014’lü yıl civarına baktığımızda iş sağlığı, risk analizi, güvenlik kültürü, inşaat, işyeri güvenliği, tarım, işle ilgili yaralanmalar karşımıza çıkar. Yeni dönem çalışmalar sarıya kayan düğümler olup bir araya toplanmadığı diğer tüm kümelerin içerisinde dağınık bir görüntü çizdiği söylenebilir. Covid19 pandemi sürecinin etkisiyle iş sağlığının öne çıktığı yeni dönem çalışma konuları arasında; covid-19, personal protective equipment, workplace violence, construction safety, safety behavior, mental health ve construction workers sayılabilir. İnşaat sektörü tüm zamanlarda araştırmacıların ilgi odağı olmuş ve yeni dönem çalışmalarda da popülerliğini arttırarak sürdürmektedir. Ufak düğümler yeni filizlenmeye başlayan konular olup gözden kaçırılmamalıdır. Burnout, total worker health, fire fighters, deep learning, machine learning, artificial intelligence, anxiety örnek olarak verilebilir.

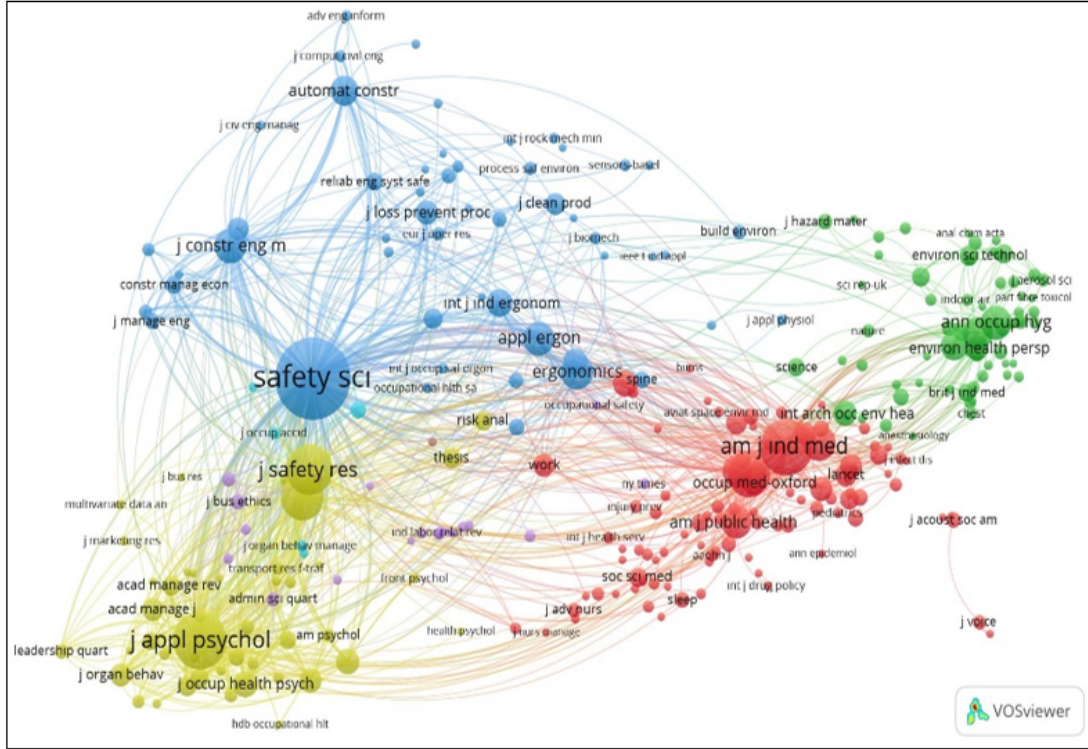






#### 4.2.2 Ortak atıf yapılan dergilerin ağ analizi

Alana katkı sunmada ve bilimsel literatürün gelişmesinde bilimsel dergiler ve veri tabanları önemli bir işleve sahiptir. Bu kapsamda dergilerin etki faktörü dergileri takip eden araştırmacıları yayınlarının tercihi ve yayın takibi konusunda yönlendirmektedir. Literatüre katkı sağlayan ve kaynaklık eden toplam 80.939 atıftan minimum “100” kez atıf yapılan dergiler dikkate alındığında 291’inin bu eşiği karşıladığı görülmüştür. VOSviewer programı aracılığı ile dergi ortak atıf ağ haritası elde edilmiş olup 5 küme öne çıkmaktadır (Şekil 5).

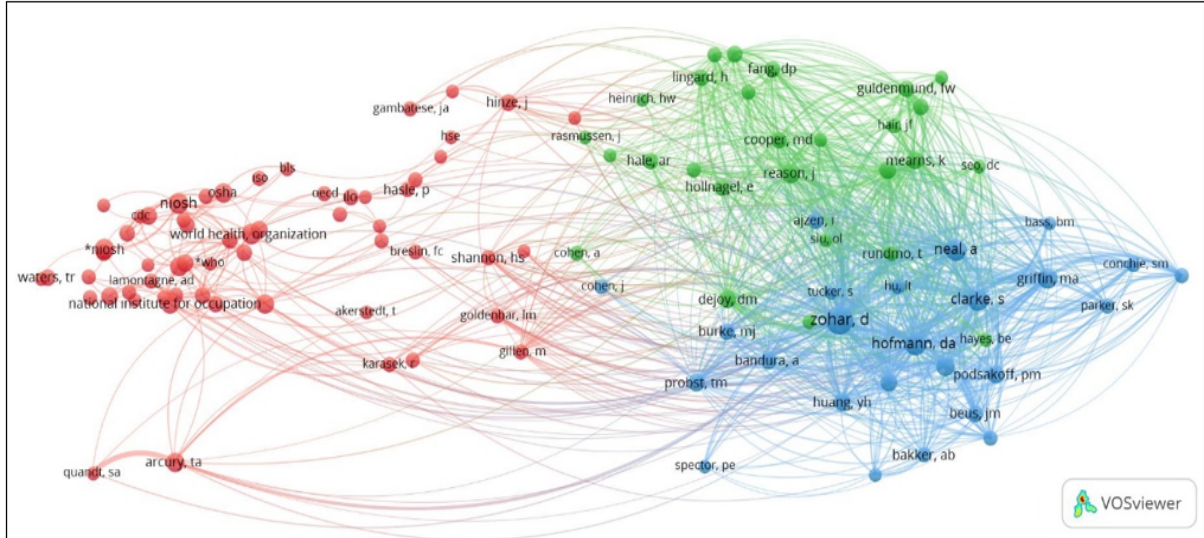


Şekil 5. Ortak atıf yapılan dergilerin ağ haritası

Kırmızı küme, 98 düğüm ile en yoğun küme olup “sağlık”, yeşil küme 69 düğüm ile “hijyen”, mavi küme 53 düğüm ile “güvenlik”, sarı küme 50 düğüm “psikoloji” ve mor küme 21 düğüm “yönetim” alanında yayın yapan dergileri içermektedir. İki dergi birbirine ne kadar yakınsa aralarındaki ilişki o kadar güçlüdür. Tüm kümeler arasında en güçlü ve en fazla bağlantıya sahip düğüm Hollanda menşeli Elsevier tarafından yayınlanan “Safety Science” dergisine aittir. Derginin güvenlik yönetimi ve güvenlik kültürü çalışmalarında lokomotif olması (Li & Hale, Output distributions and topic maps of safety related journals, 2016) diğer dergilerle olan güçlü ilişkisini desteklemektedir. Safety Science ile sıklıkla eş atıfta bulunan dergiler sırasıyla “Journal of Applied Psychology” ve “Journal of Safety Research”dir. USA menşeli ve American Psychology Association tarafından yayınlanan “Journal of Applied Psychology” kapsam bildiriminde sınırlarını “iş ve organizasyonlarda bilişsel, motivasyonel, duygusal ve davranışsal psikolojik fenomenlerin anlaşılmasını geliştiren ampirik ve teorik araştırmalar” olarak çizmiştir. USA menşeli ve Elsevier tarafından yayınlanan Journal of Safety Research dergisi multidisipliner bir yaklaşıma sahip olup kendi internet sayfasında trafik, işyeri, ev ve topluluk dâhil olmak üzere güvenlik ve sağlığın tüm alanlarında yayın yapmaktadır.

#### 4.2.3 Atıf yapılan yazarların ağ analizi

Atıf yapmanın temel işlevi, atıf yapan ile atıf yapılan belge arasında bir bağ kurmaktır (Al ve Tonta, 2004). İş güvenliği alanında yapmış oldukları çalışmalar yoğun bir şekilde ilgi gören yazarları belirlemek üzere VOSviewer (1.6.18) ile birlikte atıf yapılan yazarlara ait ağ analizi yapılmıştır. Toplam 127.772 yazara atıf yapıldığı görülmüş en az “100” kere atıf alan 111 yazardan oluşan grubun ağ haritası Şekil 6’de verilmiştir. Aynı renk kümeler güçlü işbirliğine sahip yazarların bir arada bulunduğu kümelerdir. İki yazarı birbirine bağlayan çizgi ne kadar kalınsa aralarındaki ortak ilişki o kadar güçlüdür. Ağ haritasına bakıldığı zaman düğüm sayısına göre kırmızı (59 düğüm), yeşil (27 düğüm) ve mavi (25 düğüm) renklerde 3 ayrı küme yer alır.

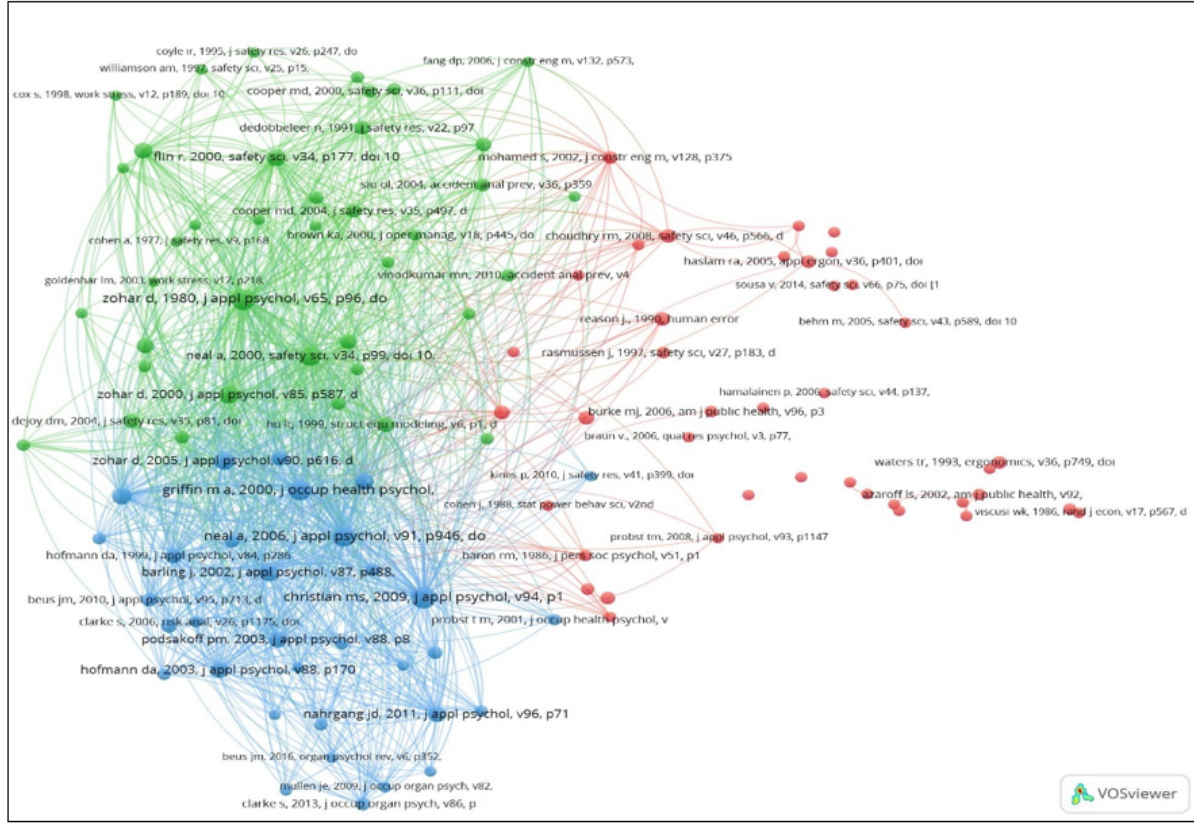


Şekil 6. Ortak alıntı yapılan yazarların ağ haritası

Kırmızı küme “occupational hygiene”, yeşil küme “sağlık ve güvenlik” ve mavi küme “güvenlik kültürü” konularında çalışma yapan yazarların yoğunlukla bir arada olduğu görülür. Bağlantı gücü en yüksek 3 yazarın yer aldığı küme mavi kümedir. Güvenlik ve sağlık alanı ile güvenlik kültürü alanına katkı veren yazarlar arasında daha güçlü bir bağ varken endüstriyel hijyen (kırmızı küme) diğer alanların uzağında ve kendi içerisinde de daha dağınık bir görüntü çizmektedir. Bu kümede alanla ilgili organizasyonların çokluğu da dikkate çekmektedir. En büyük düğüm Dov Zohar’a (h-indeks 41) ait olup diğer yazarlarla en çok ortak atıf verilen yazar konumundadır. Google Akademik verilerine göre örgütsel iklim, güvenlik iklimi, örgütsel kültür ve liderlik başlıkları araştırma alanlarıdır. Güvenlik iklimi üzerine ve ölçümü için ölçek sunan orijinal makalesi ile tanınmaktadır. İkinci sırada David Hofmann (h-indeks 43) olup araştırmaları örgütsel davranış ve alt başlıklarına konularına odaklanmaktadır. Üçüncü sırada Sharon Clarke (h-indeks 32) yer almakta olup “güvenlik kültürü”, “liderlik”, “mesleki stres” ve “kişilik” konu başlıkları çalışma alanları olarak sıralanmıştır. Doğal olarak bu alanda çalışma yapan araştırmacıların adı geçen araştırmacılara ortak atıf vermiş olmaları kaçınılmazdır.

#### 4.2.4 Ortak atıf yapılan kaynakların ağ analizi

Ortak atıf yapılan kaynakların analizi ile yazar ağı incelenmiş olup Şekil 7’de yer almaktadır. Atıf yapılan toplam 214.613 kaynaktan en az 40 ortak atıf alan kaynaklar dikkate alınmış ve 115 çalışmaya ulaşılmıştır. Makale başlığı ve yazar başlıklarında veri kaybı bulunan 3 çalışma ağ haritası listesinden çıkarılmıştır. En az on düğüme sahip 3 ayrı küme elde edilmiştir. Kırmızı küme 40 düğüm ile birinci sırada, yeşil küme 39 düğüm ile ikinci sırada ve mavi küme 33 küme ile üçüncü sıradadır. Ortak atıf yapılan araştırmaların başında en yüksek 317 alıntı ile Michael S. Christian sorumlu yazar olarak yer aldığı makale mavi kümede yer almakta olup Journal of Applied Psychology dergisinde 2009 yılında yayınlanmıştır. Çalışma performansı ve çalışma ortamının teorik modelleri üzerine inşa edilen bu çalışma, güvenlik performansı davranışlarının ve kaza ve yaralanmalar gibi güvenlik sonuçlarının kişi ve duruma dayalı öncüllerini meta analitik olarak incelemesi sonucunda elde edilen bulgulara yer vermektedir (Christian, Bradley, Wallace ve Burke, 2009). Yeşil kümede öne çıkan çalışma, 5.318 toplam bağlantı gücü ile Dov Zohar’a ait olan 1980 yılında Journal of Applied Psychology dergisinde yayınlanan makalesidir. İsrail’de 20 sanayi kuruluşunun her birinden 20 işçiden oluşan tabakalı örnekleme 40 maddelik güvenlik iklimi ölçeği oluşturulmuş ve doğrulanmıştır (Zohar, 1980). Bu çalışmanın birlikte en fazla alıntı yapılan çalışma; mavi kümenin en büyük düğüme sahip çalışma olup Christian’ın sorumlu yazar olduğu 2009 yılında yayınlanan makaledir. Kırmızı küme en fazla düğüme sahip olmakla birlikte diğer iki kümenin dışında, dağınık bir görüntü çizmekte ve aynı zamanda herhangi bir bağlantıya sahip olmayan çok sayıda düğüm içermektedir. Birlikte atıf alma yoğunluğunun düşük olduğu kümede en fazla atıf 85 atıf ile Choudhry olmuştur. Makalede inşaat sektöründe operatörlerin güvensiz davranışlarının nedenlerini araştırmışlardır (Choudhry ve Dongping, 2008). Kırmızı kümenin en güçlü bağ kurduğu çalışma Sherif Mohamed tarafından 2002 yılında yayınlanan araştırmadır. Çalışma ile şantiye ortamında güvenlik iklimi ile güvenli çalışma davranışı arasındaki ilişki araştırılmıştır (Mohamed, 2002).



Şekil 7. Ortak alıntı yapılan makalelerin ağ haritası

## 5. Sonuç

Bu çalışmada amaç, iş güvenliği alanında yapılan araştırmaların mevcut literatür içerisindeki durumunu ve zaman içerisindeki gelişiminin incelenmesidir. İş güvenliği alanında 1980 ile 2022 yılları arasında WoS veri tabanından elde edilen 8.271 makale Excel ve VOSviewer programı yardımıyla analiz edilmiştir. Üç araştırma sorusuna odaklanılarak cevaplar araştırılmıştır: (i) makalelerin genel performans özellikleri; (ii) bilimsel haritalama ile ortaya çıkan kümelerin özellikleri ve (iii) gelecekteki eğilimler.

İş güvenliği alanında yayınlanan makale sayısı, yıl bazında sürekli artan bir ivmeye sahip olup en fazla makale 890 makale ile 2021 yılında yayınlanmıştır. 2000 yılından itibaren yayınlanan makalelerin oranı %88,7'dir. Analiz sonuçları gerek üretkenlik gerekse alana olan ilginin toplam yayınlar ve toplam alıntılarla birlikte büyümeğe olduğuna işaret etmektedir. Çalışma sonucunda iş güvenliği alanına en fazla katkı sağlayan ülke 3.781 makale ile ABD olup bunu sırasıyla Çin, Almanya ve Kanada takip etmektedir. Literatüre en fazla katkıda bulunan yazar Arcury T.A (36 makale), organizasyon Center for Disease Control Prevention USA (872 makale), araştırma alanı Public Environmental Occupational Health (3393 makale) olarak tespit edilmiştir. Multidisipliner bir dergi olan "Safety Science" 454 makale ile alana katkı sunan dergilerin başında gelmektedir.

Anahtar kelime ağının geniş olmasına rağmen alana ait temel anahtar kelimeler en sık kullanılan kelimeler olarak karşımıza çıkmaktadır. İş güvenliği alanında kullanılan 17.090 anahtar kelime arasında en sık tekrarlanan kelime "occupational safety" (702) olmuştur. Bunu "safety", "occupational health", "occupational safety and health", "workplace safety", "safety climate" ve "covid-19" kelimeleri takip etmiştir. Anahtar kelimeler kullanılarak elde edilen ağ haritasında "occupational safety" kelimesinin en sık birlikte kullanılan kelimeler sırası ile "occupational health", "radiation protect", "construction industry", "operation altopics" ve "safety climate"dir. Anahtar kelimelerin araştırmacılar tarafından titizlikle seçilen ve araştırılan alana direkt işaret eden kavramlar olduğu düşünülürse güvenlik alanında yürütülen çalışmalar sağlık alanı ile güçlü bir bağlantıya sahiptir. Üstelik pandemi döneminde bu bağlantı fazlasıyla güçlenmiştir. Radyasyona ait çalışmalar görece daha eski yıllara ait çalışma başlıkları arasındadır. Sektörel açıdan incelendiğinde, inşaat sektörü farklı yönleriyle çalışılmaya devam edilen alanların başında gelmektedir. Güvenlik iklimi konusu her dönem araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Birlikte kullanılan ve son dönemde ortaya çıkan "mental health", "safety compliance", "safety motivation", "safety behavior", "safety participation" kavramlarına kaynaklık etmektedir.



İşyeri güvenliği ile ilgili araştırmaların yönetim, psikoloji, iş sağlığı ve sağlık hizmetleri literatürlerinde zengin bir geçmişi vardır (Subramonyve diğ., 2022). Zayıf güvenlik kültürü ve yerine getirilmeyen veya eksik olarak yürütülen İSG uygulamaları kendini sahada iş kazalarının yanı sıra oluşabilecek meslek hastalıkları olarak gösterir. Konunun kritik önemi ve disiplinler arası doğası iş güvenliğinin farklı yönleriyle ele alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda en sık atıf alan ilk 10 makalenin iş güvenliği alanında farklı alt konulara dağıldığı görülür ki bu durum İSG alanının multidisipliner yapısını teyit etmektedir. Ayrıca bu 10 makalenin biri dışında birden fazla yazarla yazılmış olması iş güvenliği alanındaki yazarların diğer yazarlarla işbirliğine açık olduklarının da göstergesidir. En güçlü işbirliğine sahip yazarlar olan Zohar D., Hofmann D. ve Clarke S. analizde aynı kümede yer almış olup güvenlik kültürü, örgütsel davranış, güvenlik iklimi, liderlik öne çıkan araştırma alanlarıdır.

Elde edilen bu sonuçlar iş güvenliğinin teknik boyutunun gelişmeye ve araştırmaya açık bir alan olduğunu göstermektedir. Özellikle mühendislik alanında çalışmalar yürüten araştırmacıların alana ilgileri, yürütülecek disiplinler arası çalışmalar ile iş güvenliğinin teknik boyutunu güçlendirecektir. Dergilerin kapsamlarının genişliği ve katkı sunan araştırmacıların çeşitliliği alanla ilgili bir avantaj olup çalışma yapmak isteyen diğer araştırmacıları alana çekecektir. Bibliyometrik analiz sonucunda güvenlik motivasyonu, güvenlik iletişimi, güvenlik uyumu, liderlik, iş kazaları, çalışma koşulları, yorgunluk, işyerinde şiddet, derin öğrenme, pestisitler, formaldehit, nanopartiküller araştırmaya açık alanlar olmuştur. Bu başlıklar iş güvenliğine etkileri bakımından nitel veya nicel çalışmalara konu olabilir. Farklı işkollarında yürütülecek çalışmalarla bu etkiler kıyaslanabilir. Gelecekte farklı veri tabanları kullanılarak yapılacak çalışmalarla karşılaştırma yapılabilir veya farklı yayın türlerinin (bildiri, kitap, kitap bölümü, raporlar vs.) taranarak bu alandaki eğilimler tespit edilebilir. Bu kapsamda yapılacak olan çalışmalar, hem bilimsel alana kaynaklık ederken hem de bilimsel veriler çerçevesinde yapılan düzeltici ve önleyici faaliyetler sahada kazaların azalmasını sağlayacaktır.

### Araştırmacıların katkısı

Bu araştırmada; Hatice ÖZDEMİR araştırma problemlerinin tanımlanması, makale kurgusunun planlaması, literatür taraması, teori kısmının yazımı ile analizlerin yorumlanmasında, Ramazan KAYABAŞI yazım, düzenleme ve analizlerin yorumlanmasında katkı sağlamıştır.

### Çıkar çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Al, U. ve Tonta, Y. (2004). Atıf analizi: Hacettepe Üniversitesi Kütüphanecilik Bölümü tezlerinde atıf yapılan kaynaklar. *Bilgi Dünyası*, 5(1), 19-47. doi: <https://doi.org/10.15612/BD.2004.497>
- Ali, F., Park, E. & Chae, B. (2019). 30 years of contemporary hospitality management: Uncovering the bibliometrics and topical trends. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 31(7), 2641-2665. doi: <https://doi.org/10.1108/IJCHM-10-2018-0832>
- Archambault, É., Campbell, D., Gingras, Y. & Larivière, V. (2009). Comparing bibliometric statistics obtained from the Web of Science and Scopus. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 60(7), 1320-1326. doi: <https://doi.org/10.1002/asi.21062>
- Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*. 11(4), 959-975. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Banks, C. (2019). Health, safety, well-being and economic security implications of gig work: An interdisciplinary perspective. 11 Mayıs 2023. [https://www.ilo.org/safework/events/safeday/33thinkpieces/WCMS\\_674004/langzn/index.htm%20adresinden%20al%C4%B1nd%C4%B1](https://www.ilo.org/safework/events/safeday/33thinkpieces/WCMS_674004/langzn/index.htm%20adresinden%20al%C4%B1nd%C4%B1)
- Barling, J., Loughlin, C. & Kelloway, E. K. (2002). Development and test of a model linking safety-specific transformational leadership and occupational safety. *Journal of Applied Psychology*, 87(3), 488-496. doi: <https://doi.org/10.1037/0021-9010.87.3.488>
- Birch, M. E. & Cary, R. A. (1996). Elemental carbon-based method for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Science And Technology*, 25(3), 221-241. doi: <https://doi.org/10.1080/02786829608965393>

- Boustras, G.& Waring, A. (2020). Towards a reconceptualization of safety and security, their interactions, and policy requirements in a 21st century context. *Safety Science*, 132(104942), 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104942>
- Carayon, P., Hancock, P., Leveson, N., Noy, I., Sznalwar, L.& Hootegem, G. (2015). Advancing a sociotechnical systems approach to workplace safety – developing the conceptual framework. *Ergonomics*, 58(4), 548-564. doi: <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1015623>
- Chen, H., Hou, C., Zhang, L. & Li, S. (2020). Comparative study on the strands of research on the governance model of international occupational safety and health issues. *Safety Science*, 122, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.104513>
- Choudhry, R. M.& Dongping, F. (2008). Why operatives engage in unsafe work behavior: Investigating factors on construction sites. *Safety Science*, 46(4), 566-584. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2007.06.027>
- Christian, M. S., Bradley, J. C., Wallace, C. J. & Burke, M. j. (2009). Workplace safety: A meta analysis of the roles of person and situation factors. *Journal Of Applied Psychology*, 94(5), 1103-1127. doi: <https://doi.org/10.1037/a0016172>
- ClarivateWeb of Science Core Collection (2022). Erişim adresi: <https://clarivate.com/webofsciencelibrary/solutions/web-of-science-core-collection/> (Erişim tarihi: 01.10.2022)
- Çoşkun, H. E. ve Tabak, A. (2017). Örgütsel davranış çalıştığımızda aslında ne çalışıyoruz? Türkiye’de yapılan lisansüstü tezler üzerinden bir değerlendirme. *İş ve İnsan Dergisi*, 4(2), 101-111. doi: <https://doi.org/10.18394/iid.297985>
- Das, A., & Saha, T. (2014). Authorship trends and collaborative research in the library and information science: a bibliometric study of "Desidoc Journal of Library & Information Technology" during 2005-2014. *South Asian Journal of Multidisciplinary Studies (SAJMS)*, 2(2), 1-10. Retrieved from: <http://sajms.iurc.edu.pk/index.php>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N.& Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Ellegaard, O. (2018). The application of bibliometric analysis: disciplinary and user aspects. *Scientometrics*, 116, 181-202. doi: <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2765-z>
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A. & Pappas, G. (2008). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, 22(2), 338-342. doi: <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492LSF>
- International Labour Organization (ILO) OSH Management System: A tool for continual. (2011). Retrieved from: <https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/events-training/events-meetings/world-day-safety-health-at-work/lang--en/index.htm>
- ILO (2019), Çalışma yaşamının geleceğinin merkezinde sağlık ve güvenlik: 100 Yıllık deneyimden hareketle. [https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilo-ankara/documents/publication/wcms\\_693766.pdf](https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---europe/---ro-geneva/---ilo-ankara/documents/publication/wcms_693766.pdf)
- Karasözen, B., Bayram, Ö. G. ve Zan, B. U. (2009). 1997-2006 Türkiye Bilim Göstergeleri Analizi. *Türk Kütüphaneciliği*, 23(1), 4-21. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tk/issue/48855/622444>
- Kılıkış, İ. (2018). *İş Sağlığı ve Güvenliği*. Dora Basım Yayın Dağıtım.
- Kim, J., Kang, S. & Lee, K. H. (2021). Evolution of digital marketing communication: Bibliometric analysis and network visualization from key articles. *Journal of Business Research*, 130, 552-563. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.043>
- Kiran, S. (2021). Occupational health could be the new normal challenge in the trade and health cycle: Keywords analysis between 1990 and 2020. *Safety and Health at Work*, 12(2), 272-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.11.003>
- Kyle, S. & Larivière, V. (2022). Who games metrics and rankings? Institutional niches and journal impact factor inflation. *Research Policy*, 51(10), 1-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2022.104608>

- Li, J. & Hale, A. (2015). Identification of, and knowledge communication among core safety science journals. *Safety Science*, 74, 70-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.12.003>.
- Li, J. & Hale, A. (2016). Output distributions and topic maps of safety related journals. *Safety Science*, 82, 236-244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.09.004>
- Ma, J. (2022). Lightweight deep learning models for resource constrained devices. *Computational Intelligence and Neuroscience*, , 2022, 1-8. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4293102>
- Maseda, A., Iturralde, T., Cooper, S. & Aparicio, G. (2022). Mapping women's involvement in family firms: A review based on bibliographic coupling analysis. 24(2), 279-305. doi: <https://doi.org/10.1111/ijmr.12278>
- Massimo, A. & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-975. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Merig, J. & Yang, J.-B. (2017). Accounting research: A Bibliometric analysis. *Australian Accounting Review*, 27(1), 71-100. doi: <https://doi.org/10.1111/auar.12109>.
- Merigó, J. M., Miranda, J., Modak, N. M., Boustras, G. & de la Sotta, C. (2019). Forty years of Safety Science: A bibliometric overview. *Safety Science*, 115, 66-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.01.029>.
- Mohamed, S. (2002). Safety Climate in construction site environments. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(5), 375-384. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:5\(375\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:5(375))
- Nahrgang, J. D., Morgeson, F. P. & Hofmann, D. A. (2011). Safety at work: A meta-analytic investigation of the link between job demands, job resources, burnout, engagement, and safety outcomes. *Journal of Applied Psychology*, 96(1), 71-94. doi: <https://doi.org/10.1037/a0021484>
- Naveen, D., Satish, K., Mukherjee, D., Pandey, N. & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285-296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Neal, A. & Griffin, M. A. (2006). A study of the lagged relationships among safety climate, safety motivation, safety behavior, and accidents at the individual and group levels. *Journal of Applied Psychology*, 91(4), 946-953. doi: <https://doi.org/10.1037/0021-9010.91.4.946>
- Newaz, M. T., Ershadi, M., Jefferies, M., Pillay, M. & Davis, P. (2022). A systematic review of contemporary safety management research: a multi-level approach to identifying trending domains in the construction industry. *Construction Management and Economics*, 41(2), 97-115. doi: <https://doi.org/10.1080/01446193.2022.2124527>
- Palaz, S. (2019). *Sosyal Bilimlerde İş Sağlığı ve Güvenliği Uygulamaları*. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim ve Danışmanlık.
- Pesta, B., Fuerst, J. & Kirkegaard, E. O. (2018). Bibliometric keyword analysis across seventeen years (2000–2016) of intelligence articles. *Journal of Intelligence*, 6(4), 1-12. doi: <https://doi.org/10.3390/jintelligence6040046>
- Subramony, M., Golubovskaya, M., Keating, B., Solnet, D., Field, J. & Witheriff, M. (2022). The influence of pandemic-related workplace safety practices on frontline service employee wellbeing outcomes. *Journal of Business Research*, 149, 363-374. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2022.05.040>
- Sümer, H. H. (2018). *İş Sağlığı ve Güvenliği Hukuku*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Tamdoğan, O. G. (2009). Bilgi üretiminde yazın ürünleri ve kütüphaneler: Atıfların tespiti ve analizi yoluyla araştırma. *Türk Kütüphaneciliği*, 23(2), 254-277. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/pub/tk/issue/48929/624162>
- Tonta, Y. (2017). Türkiye’de yayımlanan ve Web of Science’ta dizinlenen dergilerle ilgili bir değerlendirme. *Türk Kütüphaneciliği*, 31(4), 449-482. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tk/issue/48646/618435>
- TÜBİTAK Cahit Arf Bilgi Merkezi (2023). Erişim adresi: <https://cabim.ulakbim.gov.tr/bibliyometrik-analiz/bibliyometrik-analiz-sikca-sorulan-sorular/>
- Van Nunen, K., Li, J., Reniers, G. & Ponnet, K. (2018). Bibliometric analysis of safety culture research. *Safety Science*, 108, 248-258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.011>

Vijayakumarve, R.& Choi, J. H. (2022). Emerging trends of ergonomic risk assessment in construction safety management: A scientometric visualization analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 1-16. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph192316120>

VOSviewer. VOSviewer: Visualizing Scientific Landscape (2022)Retrieved from: <https://www.vosviewer.com/features/highlights>

Wani, S. A., Akhter, M. & Musthtaq, R. (2021). Bibliometric analysis of google scholar indexed top journals in socialsciences. *Journal Of Indian Library Association*, 57(3), 41-52. Retrieved from: <https://ilaindia.net/jila/index.php/jila/article/view/674>

Yalçın, S., Yavuz, H. Ç. ve Dibek, M. İ. (2015). En yüksek etki faktörüne sahip eğitim dergilerindeki makalelerin içerik analizi. *Eğitim ve Bilim*, 40(182), 1-28. doi: <https://doi.org/10.15390/EB.2015.4868>

Yıldız, A. N., & Şahan , C. (2020). İş sağlığı ve güvenliği temel kavramlar. İçinde A. N. Yıldız, & A. Sandal, *İş Sağlığı ve Güvenliği Meslek Hastalıkları* (s. 27). Hacettepe Üniversitesi Yayınları.

Zeng, L. & Li, R. M. (2022). Construction safety and health hazard awareness in Web of Science and Weibo between 1991 and 2021. *Safety Science*, 152, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105790>

Zohar, D. (1980). Safety climate in industrial organization: Theoretical and applied implications. *Journal of Applied Psychology*, 65(1), 96-102. doi: <https://doi.org/10.1037/0021-9010.65.1.96>



# Journal of Turkish Operations Management

## Nakit akım temelli finansal performans analizi için bir oyun-teorik yaklaşım: BIST otomotiv sektörü firmaları üzerine bir uygulama

Furkan Göktaş<sup>1\*</sup>, Meltem Ece Çokmutlu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü, Karabük  
furkangoktas@karabuk.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9291-3912>

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Bölümü, Karabük  
meltemece@karabuk.edu.tr, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5260-3925>

\*Sorumlu Yazar

### Makale Bilgisi

#### Makale Geçmişi:

Geliş: 07.02.2024  
Revize: 25.04.2024  
Kabul: 28.04.2024

#### Anahtar Kelimeler:

Çok kriterli karar verme,  
Finansal performans,  
Nakit akım,  
Oyun teorisi,  
TOPSIS

### ÖZET

Bu çalışmanın amacı BIST otomotiv sektörü firmalarının 2018-2022 dönemindeki nakit akım temelli finansal performansını bütüncül bakış açısıyla değerlendirmektir. Bu kapsamda bir bulanık çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımı olan Oyun-Teorik Bulanık Değerlendirme Sistemi (G-FES) kullanılmıştır. Bununla birlikte her bir yıl için ayrı ayrı elde edilen TOPSIS sıralamaları kullanılarak iki oyunculu sıfır toplam bir oyun oluşturulmuştur. Bu oyunun çözümü de beş yıllık periyod için sonuç vermekte ve G-FES sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmaktadır. Yapılan analizin sonucunda; en yüksek performansa sahip olan firmaların ASUZU, KARSN ve TTRAK olduğu görülmüştür. Öte yandan bunların kendi içindeki sıralaması riskten kaçınma derecesine bağlı olarak değişmektedir.

## A game - theoretical approach for the cash flow based financial performance analysis: an application on BIST automotive industry firms

### Article Info

#### Article History:

Received: 07.02.2024  
Revised: 25.04.2024  
Accepted: 28.04.2024

#### Keywords:

Multi-criteria decision-making,  
Financial performance,  
Cash flow,  
Game theory,  
TOPSIS

### Abstract

This study aims to evaluate the cash flow-based financial performance of BIST automotive sector companies in the 2018-2022 period from a holistic perspective. In this context, we use the Game-Theoretical Fuzzy Evaluation System (G-FES), a fuzzy multi-criteria decision-making (MCDM) approach. In addition, we form a two-player zero-sum game using the TOPSIS rankings obtained separately for each year. The solution of this game also gives results for the five-year period and is used to compare G-FES results. As a result of our analysis, we observe that the companies with the highest performance are ASUZU, KARSN, and TTRAK. On the other hand, their ranking varies depending on the degree of risk aversion.

## 1. Giriş

Temel bir endüstri kolu olan otomotiv sektöründe her yıl 80 milyonun üzerinde üretim gerçekleştiği görülmektedir (OICA, 2022). Pandemi, savaş, yüksek enflasyon ve hammadde fiyat artışları gibi önemli sorunlar dünya ekonomisinde belirsizlik dönemi başlatmıştır. Bu durum otomotiv sektöründe pazar büyüklüğü, gelirler, maliyetler gibi birçok göstergede değişikliklere neden olmaktadır. Ayrıca sektöre has yarı iletken tedarik sorunu gibi durumlar üretim hacimlerinde değişikliğe neden olan unsurlardandır. Otomotiv sektörü satış, depolama, garanti gibi birçok alanda uluslararası piyasalara entegrasyonun yüksek olduğu sektörlerdendir (Ayıkoğlu Zaif ve Karapınar, 2021). Bu nedenle pandemi, savaş, küresel enflasyon gibi uluslararası piyasaları etkileyen birçok durum otomotiv sektöründe yer alan ve yüksek istihdam rakamlarına sahip firmalar için finansal bir belirsizliğe neden olmaktadır.



Belirsizlik dönemlerinde yaşanan değişimlere uyum sağlayabilmek için nakit akım temelli performans ölçümlerinin sağlayacağı bilgiler önemli bir araç konumundadır. Firmalarda, bilanço ve gelir tablosu kullanılarak yapılan ölçümlerin bu gibi belirsizlik dönemlerinde gerçek mali durumu göstermede yetersiz kaldığı görülmektedir (Sakarya ve Akkuş, 2015). Zira bilanço ve gelir tablosu tahakkuk esasına göre hazırlanırken nakit akım tablosu ise nakit esasına göre hazırlanmaktadır. Bu sayede firmada gerçekleşmiş nakit giriş ve çıkışlarının belirlenmesi ve pozitif nakit akım yaratma gücünün ortaya çıkarılması sağlanmaktadır. Bu tablodan elde edilen bilgiler sayesinde firmaların borç ödeme güçleri, likidite düzeyleri, temettü kararları, ek finansman ihtiyacı, gelecekte pozitif nakit akım yaratabilme gücü gibi birçok hayati bilgiye ulaşabilmek mümkün olmaktadır. Belirsizlik ve risklerin arttığı dönemlerde, nakit yaratan ve nakit çıkışına neden olan faaliyetleri nakit akım tablosu aracılığıyla net bir şekilde görebilmek yöneticilere karar almalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunun yanı sıra kredi verenler, tedarikçiler de firmaların borç ödeme güçleri hakkında bilgi sahibi olmak istemektedirler. Özetle nakit akım temelli performans ölçümünün tüm paydaşların karar almalarında kullanılabileceği destekleyici, tamamlayıcı bilgiyi sağladığını söylemek mümkündür.

Firmaların finansal performans ölçümüne ilişkin bilimsel yazın incelendiğinde ÇKKV yöntemleri ile yapılan araştırma sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Araştırmalarda genel olarak nakit akım temelli oranların veya tahakkuk temelli geleneksel oranların kullanıldığı bir gösterge seti oluşturulmaktadır. Araştırmalarda farklı sektörlerden firmaların performans analizinin yapıldığı görülmektedir. Performans analizleri genellikle ardışık yıllar için yapılmakta ve sonrasında tüm yıllar için ayrı ayrı bir değerlendirme yapılmaktadır (Sakarya ve Akkuş, 2015; Vargün ve Uygurtürk, 2016; Tutkavul, 2018; Güleç ve Bektaş, 2019; Sakarya ve Erayman, 2022). Bu yaklaşım; bütünün öneminin, parçalarının toplam öneminden daha yüksek olması nedeniyle değerlendirmede yeterli görülmemektedir. Bu yetersiz değerlendirmelere bir çözüm olarak Tutkavul (2018), Ayıkoğlu Zaif ve Karapınar (2021), Sakarya ve Saçkes (2022) çalışmalarında da olduğu gibi analiz periyodundaki her bir yıl için verilerin merkezi eğilimi kullanılarak performans değerlendirme kapsamı genişletilmektedir. Öte yandan sadece merkezi eğilim ölçüsünü kullanarak analiz yapmak, verilerin dağılımının ve çarpıklığının ihmal edilmesi demektir. Bu ihmal ise önemli bilgi kaybına neden olmaktadır.

Bu bağlamda bu çalışmanın motivasyonu, finansal performans değerlendirmede söz konusu eksiklikleri giderecek bütüncül bakış açısı sunmaktır. Çalışmanın amacı BIST otomotiv sektörü firmalarının 2018-2022 dönemindeki nakit akım temelli finansal performansını değerlendirmektir. Bu kapsamda üçgensel bulanık sayıları kullanan G-FES yöntem olarak tercih edilmiştir. Çünkü G-FES verilerin minimum, medyan ve maksimum değerlerinin dikkate alınmasına imkan vermektedir. Bununla birlikte TOPSIS temelli iki aşamalı hibrit yaklaşım, G-FES sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Söz konusu yaklaşımın ilk aşamasında analiz periyodundaki her bir yıl için TOPSIS sıralamaları ayrı ayrı bulunmuştur. İkinci aşamada bu sıralamalar kullanılarak iki oyunculu sıfır toplamlı bir oyun oluşturulmuş ve çözülmüştür.

Bu çalışmada ekonomide önemli bir yere sahip olan otomotiv sektörünün aktif büyüklüğü ve hasılat göstergeleri ile sektörü temsil kabiliyeti yüksek firmaları (TCMB, 2024), G-FES ve iki aşamalı hibrit yaklaşım ile nakit temelli göstergeler üzerinden analiz edilmiş ve firmaların 2018-2022 periyodundaki finansal performansları bütüncül bir bakış açısıyla sunularak bilimsel yazındaki boşluk doldurulmak istenmiştir. Bu çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde nakit akım temelli finansal performans analizi için kavramsal çerçeveye ve bilimsel yazın taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde G-FES ve iki aşamalı hibrit yaklaşım aşamalarıyla açıklanmıştır. Dördüncü bölümde BIST otomotiv sektörü firmalarının 2018-2022 dönemindeki nakit akım temelli finansal performans analizi için elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Beşinci bölümde söz konusu bulgular tartışılmış ve çalışma sonuçlarına değinilmiştir.

## 2. Kavramsal Çerçeve ve Bilimsel Yazın Taraması

Muhasebe temelli ve piyasa temelli oranlara dayalı olarak yapılan finansal analizler paydaşların firmaya ilişkin finansal performansını okumakta yetersiz kalmaktadır. Finansal analiz kapsamının genişletilerek firmaların nakit yaratma potansiyellerinin analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır (Vargün ve Uygurtürk, 2016). Nakit akım tablosu firmaların belirli bir hesap dönemi içerisinde ortaya çıkan nakit akımlarını (nakit giriş ve çıkışlarını), kaynak ve kullanım yerleri çerçevesinde gösteren bir finansal tablodur. Bu tablo ile dönem içerisindeki faaliyetlerin ne kadarının firmanın esas faaliyetlerinden, olağandışı işlemlerinden, yatırım ve finansman faaliyetlerinden kaynaklandığı ayrıntılı şekilde sunulmaktadır (Sayılğan, 2013). Firmanın esas faaliyetlerinden sağlanan nakit akımları, hasılat yaratan ana faaliyetleri ile yatırım ve finansman faaliyeti niteliğinde olmayan diğer faaliyetlerden elde edilen nakit akımlarıdır. Bu nakit akımları öncelikli olarak hasılat yaratan unsurlardan elde edilmektedir. Yatırım faaliyetlerinden sağlanan nakit akımları, uzun vadeli varlıklar ile nakit benzeri olarak nitelendirilmeyen diğer yatırımların edinilmesi ve elden çıkarılması ile elde edilir. Üçüncü grup olan finansman faaliyetlerinden nakit akımları firmanın ödenmiş sermayesinin ve borçlanmalarının büyüklüğünde ve birleşiminde değişikliğe neden olan faaliyetlerden sağlanmaktadır. Nakit akım tabloları doğudan ve dolaylı olarak üzere iki

şekilde raporlanmaktadır. TMS 7.18 doğrudan sunum yöntemini önermekte ise de dolaylı sunum yöntemini de kabul etmektedir. Doğrudan yöntemde brüt nakit giriş ve çıkışları dikkate alınmakta, dolaylı yöntemde ise net dönem karı/zararı esas alınarak tablo hazırlanmaktadır (TMS, 2018).

Nakit akım tablosu finansal tablolar seti içerisinde nakit esasına dayalı şekilde hesaplanan tek finansal tablodur. Dolayısıyla bu tablo ile elde edilen finansal bilgiler firmalar için son derece önemlidir (Sayılğan, 2013). Firmaların bilanço ve gelir tabloları ile karlılığını ve finansal durumunu analiz edebilmek mümkündür. Ancak bilançodaki verilerin statik olması, gelir tablosunda ise nakit akışı gerektirmeyen kalemlerin yer alması gibi nedenlerle firmaların borç ödeme güçlerini doğru şekilde tespit edebilmek mümkün olmamaktadır (Cavlak vd., 2017). Örneğin bir firmanın kar rakamı tahakkuk esasına dayalı hesaplanmış bir kavramdır ve firmanın kar elde etmiş olması günlük masraflarını karşılamaya, mevcut yükümlülüklerini ödemeye ve operasyonlar için gerekli varlıkları satın almaya yetecek kadar nakde sahip olmasını mümkün kılmayabilir. Bu gibi konulara ilişkin ihtiyaç duyulan bilgiler nakit akım tabloları ile elde edilir (Sayılğan, 2013; Güleç ve Bektaş, 2019). Nakit akım tablosu aracılığıyla firmaların gelecekte pozitif akım yaratabilme, borç yükümlülüklerini yerine getirme ve temettü ödeme güçleri tespit edilir. Farklı muhasebe politikalarının etkilerini azaltarak firmaları daha tutarlı şekilde karşılaştırabilme olanağı nakit akım tablosunun sağladığı faydalardandır (Cavlak vd, 2017; Tutkavul, 2018).

Nakit akım temelli finansal performans ölçümüne ilişkin bilimsel yazın incelendiğinde ÇKKV yöntemlerinin yoğun kullanıldığı görülmektedir. Bilimsel yazındaki örnekler bakıldığında; Sakarya ve Akkuş (2015) 2010-2013 yıllarına ilişkin BIST çimento firmalarının geleneksel ve nakit akım temelli finansal performanslarını tespit ettikleri çalışmalarında ÇKKV yöntemlerinden TOPSIS yöntemini kullanmışlar ve araştırma sonucundan geleneksel ve nakit akım temelli performans sıralamaları arasında fark olduğunu tespit etmişlerdir. Vargün ve Uygurtürk (2016) çalışmalarında BIST'e kayıtlı inşaat ve bayındırlık sektöründen 9 firmanın, 2013-2015 yıllarını kapsayan dönem ilişkin nakit akım temelli oranlarını kullanarak ÇKKV yöntemlerinden VIKOR ile performans analizi yapmış ve yıllar itibari ile sıralamaları karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Yılmaz ve İçten (2018) çalışmalarında BIST'e kayıtlı gayrimenkul yatırım ortaklığı firmalarının nakit akım temelli finansal oranlarını TOPSIS yöntemi ile analiz etmiş ve yıllar itibariyle sektörün gelişimini değerlendirmiştir. Tutkavul (2018) çalışmasında 2012-2016 dönemlerine ilişkin BIST otomotiv firmalarının nakit akım temelli oranlarını PROMETHEE yöntemi ile analiz etmiş, çalışma sonucunda yıllar itibari ile firma performansları sıralanmıştır. Kaplanoğlu (2018) çalışmasında BIST kimya, petrol, kauçuk ve plastik (KPKP) ürünler sektöründeki firmaların nakit akım temelli performans analizini ARAS ve COPRAS yöntemleri ile 2016 yılı kapsamında gerçekleştirmiş ve performans sıralamalarında yakınsak sonuçlar elde etmiştir. Güleç ve Bektaş (2019) BIST imalat sanayi endeksinde yer alan 107 firmayı inceledikleri çalışmalarında 2008-2017 dönemlerine ilişkin 8 temel nakit akım oranı ve 10 geleneksel finansal oran hesaplamış ve firmalarda yeterli nakit akımı olmadığı, kar kalitesinin düşük olduğu ve dış finansman ihtiyacının yüksek olduğunu tespit etmiştir. Gürkan ve Büyükatak (2021) çalışmalarında BIST Kimya sektörünün nakit akım temelli performans analizini TOPSIS yöntemi ile 2018-2019 yılları kapsamında incelemişler ve yıllar itibariyle sonuçları karşılaştırmalı sunmuşlardır. Sakarya ve Saçkes (2022) BIST Ulaştırma endeksinde yer alan 8 firmanın 2018-2020 yıllarına ilişkin nakit akım temelli oranları kullanarak yaptıkları çalışmalarında ÇKKV yöntemleri ile her yıl için finansal performansları sıralamaları elde etmişlerdir. Ayıkoğlu Zaif ve Karapınar (2021) çalışmalarında halka açık otomotiv sektörü firmaların pandemi sürecindeki finansal performanslarını incelemişlerdir. Sakarya ve Erayman (2022) BIST Bilişim sektörü firmalarının 2017-2020 yıllarına ilişkin nakit akım temelli oranları üzerinden PROMETHEE yöntemi ile yaptıkları çalışmalarında tüm analiz dönemlerinde ilk sırada yer alan tek bir firmanın olmadığı, sektörde yer alan firmaların finansal performansının istikrarlı olmadığı sonucuna ulaşmışlardır. Bozkır ve Ataman (2023) çalışmalarında BIST Perakende sektörü firmalarının 2017-2021 dönemine ilişkin nakit akım temelli performans analizini Gri İlişkisel Analiz yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda pandemi etkisi ile sıralamaların değiştiği görülmüştür.

### 3. Yöntem

#### 3.1. Oyun-Teorik Bulanık Değerlendirme Sistemi (G-FES)

Bu bölümde üçgensel bulanık sayıları kullanan G-FES anlatılmıştır. Üçgensel bulanık sayılar üç parametre ile temsil edilir. G-FES kapsamında ilk (son) parametre en kötü (iyi) duruma karşı gelirken, ikinci parametre baz duruma karşı gelir. Üçgensel bulanık sayı (c, d, e) için üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$\mu(t) = \begin{cases} 1 - \frac{d-t}{d-c}, & c \leq t < d \\ 1, & t = d \\ 1 - \frac{t-d}{e-d}, & d < t \leq e \\ 0, & \text{değilse} \end{cases} \quad (1)$$

Farklı normalizasyon yöntemleri vardır. n adet alternatifi, m adet kriteri temsil eden  $A_{n \times m} = (a_{ij})$  matrisinin orana dayalı normalizasyonu aşağıdaki gibidir (Vafaei ve diğ., 2016). Burada A matrisinin j. sütununun en iyi değeri  $\beta_j$ , en kötü değeri  $\alpha_j$  olarak alınmıştır. Normalizasyonla elde edilmiş  $B_{n \times m} = (b_{ij})$  matrisinin elemanları  $[0,1]$  kapalı aralıktadır.

$$b_{ij} = \frac{|a_{ij} - \alpha_j|}{|\beta_j - \alpha_j|}, \text{ her } i, j \text{ için} \quad (2)$$

Göktaş ve Gökerik (baskıda) tarafından önerilen G-FES'in finansal performans analizi için adımları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

**Adım 1:** Her bir yılın verisi (2) eşitliği ile birbirlerinden bağımsız olarak normalize edilir.

**Adım 2:** i. alternatif - j. kriter ikilisi için, normalize edilmiş değerlerin minimumu  $c_{ij}$ , medyanı  $d_{ij}$  ve maksimumu  $e_{ij}$  olarak atanarak bulanık fayda  $(c_{ij}, d_{ij}, e_{ij})$  üçgensel bulanık sayısı olarak belirlenir. Bulanık karar matrisinin (F) elemanları söz konusu bulanık faydalardır.

$E_B()$  bulanık ortalama operatörü iken i. alternatif - j. kriter ikilisi için faydanın bulanık ortalaması  $(m_{ij})$  aşağıdaki gibidir (Carlsson ve diğ., 2002).

$$m_{ij} := E_B((c_{ij}, d_{ij}, e_{ij})) = \frac{c_{ij} + 4d_{ij} + e_{ij}}{6} \quad (3)$$

$STD_B()$  bulanık standart sapma operatörü iken i. alternatif - j. kriter ikilisi için faydanın bulanık standart sapması  $(s_{ij})$  aşağıdaki gibidir (Carlsson ve diğ., 2002).

$$s_{ij} := STD_B((c_{ij}, d_{ij}, 1)) = \frac{1 - c_{ij}}{2\sqrt{6}} \quad (4)$$

**Adım 3:**  $M_{n \times m} = (m_{ij})$  bulanık ortalama matrisi (3) eşitliği kullanılarak oluşturulur.

**Adım 4:**  $S_{n \times m} = (s_{ij})$  bulanık standart sapma matrisi (4) eşitliği kullanılarak oluşturulur.

Karar vericinin amaçları sırasıyla faydanın bulanık ortalamasını maksimize etmek ve bulanık standart sapmasını minimize etmek olsun. İlk amacın ağırlığı  $w \in [0,1]$  olmak üzere ödemeler matrisi (P) aşağıdaki gibi tanımlansın. Karar verici risk nötrse  $w = 1$  alınır. Karar vericinin riskten kaçınma derecesi en yüksekse  $w = 0$  alınır, orta düzeyse  $w = 0.5$  alınır (Göktaş ve Gökerik, baskıda).

$$P := wM - (1-w)S \quad (5)$$

**Adım 5:** (5) eşitliği kullanılarak, belirlenen  $w \in [0,1]$  için ödemeler matrisi (P) oluşturulur.

Amaçların doğrusallığından dolayı, x ve y sırasıyla alternatiflerin ve kriterlerin negatif olmayan ağırlık vektörleri olmak üzere ağırlıklı amaç fonksiyonu  $x^T P y$  ifadesine eşittir. ( $x^T$  satır vektörü, x sütun vektörünün transpozudur.) Bu bilgi doğrultusunda G-FES, aşağıdaki ifade ile tanımlanır ve ödemeler matrisi  $P_{n \times m} = (p_{ij})$  olmak üzere iki oyunculu sıfır toplamlı oyuna karşı gelir (Göktaş ve Gökerik, baskıda).

$$\max_x \min_y x^T P y \quad (6a)$$

(6a)'nın satır oyuncusu (karar verici) için çözümü aşağıdaki doğrusal en iyileme probleminin en iyi çözümüdür (Gilpin ve Sandholm, 2008). Bu problemin en iyi çözümü tek olmayabilir ama bu çalışmada bu çözümün tek olduğu varsayılmıştır.

maks  $t$

$$k.a. \sum_{i=1}^n p_{ij} x_i \geq t, \text{ her } j \text{ için} \quad (6b)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

$$x_i \geq 0, \text{ her } i \text{ için}$$

(6b)'nin dual problemi aşağıdaki gibidir (Gilpin ve Sandholm, 2008). Bu problemin en iyi çözümü olan  $y^*$  vektörü kriterlerin ağırlık vektörüdür. Buna göre G-FES kriterlerin ağırlıklarını objektif bir şekilde belirler.

min  $t$

$$k.a. \sum_{j=1}^m p_{ij} y_j \leq t, \text{ her } i \text{ için} \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m y_j = 1$$

$$y_j \geq 0, \text{ her } j \text{ için}$$

**Adım 6:** (6b)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek alternatiflerin öncelik vektörü ( $x^*$ ) bulunur. (7)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek kriterlerin ağırlık vektörü ( $y^*$ ) bulunur.

**Adım 7:** Öncelik değerlerine göre alternatifler sıralanır ve/veya kaynakların alternatiflere dağıtımı yapılır. Öncelik değeri 0 olan birden fazla sayıda alternatif varsa bunların sıraları eşit alınır.

### 3.2. İki Aşamalı Hibrit Yaklaşım

Öklid uzaklığını kullanan TOPSIS, en iyi bilinen ve en çok kullanılan ÇKKV yöntemlerindedir. Bu yöntemin adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Chakraborty, 2022; Karami ve Johansson, 2014):

**Adım 1:** Karar matrisi (A) oluşturulur.

**Adım 2:** Vektör normalizasyonu ile A matrisi normalize edilir ve normalize edilmiş karar matrisi (B) oluşturulur.

**Adım 3:** B matrisinin j. sütunundaki değerler j. kriterin ağırlığı ile çarpılarak ağırlıklı normalize edilmiş karar matrisi (C) oluşturulur.

**Adım 4:** C matrisinin j. sütununun en iyi (kötü) değerleri kullanılarak pozitif (negatif) ideal çözüm belirlenir.

**Adım 5:** i. alternatifin pozitif ideal çözüme Öklid uzaklığı ( $p_i$ ) ve negatif ideal çözüme Öklid uzaklığı ( $n_i$ ) ayrı ayrı hesaplanır. İdeal çözüme benzerlik indeksi  $n_i/(n_i+p_i)$  ifadesiyle bulunur. Alternatifler, benzerlik indekslerine göre büyükten küçüğe sıralanır.

Bu çalışmada kullanılan iki aşamalı hibrit yaklaşımın aşamaları aşağıdaki gibidir.

**Aşama 1:** Her bir yıl için TOPSIS ayrı ayrı uygulanarak alternatiflerin sıralamaları bulunur. Periyottaki yıl sayısı m olmak üzere, i. alternatifin j. yıl için sıralaması  $r_{ij}$  olmak üzere  $R_{n \times m} = (r_{ij})$  sıralama matrisi oluşturulur.

**Aşama 2a:** R matrisi orana dayalı normalizasyonla  $P_{n \times m} = (p_{ij})$  ödemeler matrisine aşağıdaki gibi dönüştürülür.

$$p_{ij} = \frac{|r_{ij} - n|}{|1 - n|}, \text{ her } i, j \text{ için} \quad (8)$$

**Aşama 2b:** (6b)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek alternatiflerin öncelik vektörü ( $x^*$ ) bulunur. (7)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek analiz periyotundaki yılların ağırlık vektörü ( $y^*$ ) bulunur.

**Aşama 2c:** Öncelik değerlerine göre alternatifler sıralanır ve/veya kaynakların alternatiflere dağıtımı yapılır. Öncelik değeri 0 olan birden fazla sayıda alternatif varsa bunların sıraları eşit alınır.

## 4. Bulgular

Bu bölümde BIST otomotiv sektörü firmalarının 2018-2022 dönemindeki nakit akım temelli finansal performans analizi sırasıyla G-FES ve iki aşamalı hibrit yaklaşım kullanılarak yapılmıştır. Analiz kapsamında yer alan sekiz

firmaya ait bilgiler Tablo 1’de sunulmuştur. Firmalar otomotiv sektöründe motorlu kara taşıtı, araç ve yedek parçaları, arazi araçları üretimi, satışı, ithalatı, ihracatı faaliyetlerini yerine getirmekte ve satış sonrası hizmetler de sunmaktadır (TCMB, 2024).

**Tablo 1.** Analiz kapsamındaki firmalar.

Firmalar	BIST Kodu
Anadolu Isuzu	ASUZU
Doğuş Otomotiv	DOAS
Ford Otosan	FROTO
Karsan Otomotiv	KARSN
Otokar	OTKAR
Tümosan Traktör	TMSN
Tofaş Türk Otomobil Fabrikası	TOASO
Türk Traktör	TTRAK

Finansal performans ölçümünde nakit akım tablosu, bilanço ve gelir tablosu verileri kullanılarak çeşitli finansal oranlar hesaplanmaktadır. Bu çalışmada da nakit akım temelli finansal performans analizi için Tablo 2’de sunulan finansal oranlar kullanılarak finansal performans ölçümü yapılmıştır. Finansal oranlara ilişkin veriler Kamuyu Aydınlatma Platformu (KAP)’ndan elde edilmiştir.

**Tablo 2.** Nakit akım temelli finansal performans analizi için kriterler.

Kod	Oran	Formül	Kaynak
K1	Nakit Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar / Kısa Vadeli Borçlar	Sakarya ve Akkuş (2015); Vargün ve Uygurtürk (2016); Başar ve Azgın (2016); Güleç ve Bektaş (2019); Bozkır ve Ataman (2023)
K2	Varlıkların Nakit Getiri Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar/Toplam Varlıklar	Sakarya ve Akkuş (2015); Vargün ve Uygurtürk (2016); Başar ve Azgın, (2016); Güleç ve Bektaş (2019); Bozkır ve Ataman (2023)
K3	Nakit Borç Karşılama Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar/Toplam Borç	Sakarya ve Akkuş (2015); Vargün ve Uygurtürk (2016)
K4	Nakit Akım Marjı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar/Net Satışlar	Sakarya ve Akkuş (2015); Vargün ve Uygurtürk (2016); Güleç ve Bektaş (2019); Başar ve Azgın (2016)
K5	Ortakların Nakit Getiri Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar/Öz Kaynaklar	Sakarya ve Akkuş (2015); Vargün ve Uygurtürk (2016); Başar ve Azgın (2016); Tutkavul (2018); Güleç ve Bektaş (2019); Bozkır ve Ataman (2023)
K6	Nakit Dönüş Süresi	Alacakların Tahsil Süresi + Stokların Devir Süresi- Borçların Ertelenme Süresi*	Vargün ve Uygurtürk (2016), Ege ve diğ. (2016)
K7	Kazanç-Kar Kalitesi Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar/Net Kar	Başar ve Azgın (2016); Tutkavul (2018); Bozkır ve Ataman (2023)

K8	Satışlardan Elde Edilen Nakdin Net Satışlara Oranı	İşletme Faaliyetlerinden Nakit Akımlar-Kar Payları/Net Satışlar	Başar ve Azgın (2016); Tutkavul (2018); Sakarya ve Saçkes (2022)
----	--	---	--

\*Alacakların Tahsil Süresi = Alacaklar / (Net Satışlar / 360); Stokların Devir Süresi = Stoklar / (Satışların Maliyeti / 360); Borçların Erteleme Süresi = Kısa Vadeli Borçlar / (Satışların Maliyeti / 360)

Çalışma kapsamında Tablo 2’de sunulduğu üzere nakit akım temelli sekiz farklı oran kullanılmıştır. K1 işletme faaliyetlerinden sağlanan nakdin kısa vadeli borçları karşılayabilme gücünü, K2 toplam varlıkların nakit yaratma etkinliğini, K3 işletme faaliyetlerinden sağlanan nakdin toplam borcu karşılayabilme gücünü, K4 satışların nakde çevrilme gücünü, K5 özkaynakların nakit yaratma etkinliğini, K6 işletme faaliyetlerinden ne kadar sürede nakit sağlandığını, K7 net karın nakit olarak toplanma yüzdesini ve K8 satışların nakit üretme derecesini göstermektedir. K6 kriteri hariç diğer kriterler fayda yönlü kriterlerdir ve dolayısıyla yüksek olması istenir. K6 maliyet yönlü kriterdir ve düşük olması istenir (Sakarya ve Akkuş 2015; Başar ve Azgın, 2016; Vargün ve Uygurtürk 2016; Tutkavul, 2018).

Tablo 3’te 2022 yıl sonu, Tablo 4’te 2021 yıl sonu, Tablo 5’te 2020 yıl sonu, Tablo 6’da 2019 yıl sonu ve Tablo 7’de 2018 yıl sonu finansal raporları kullanılarak Tablo 2’de belirtilen formüller yardımıyla hesaplanan finansal oranların değerleri verilmiştir. Örneğin, 2022 yıl sonu finansal raporlarına göre ASUZU için K1 değeri 0.1372 olarak hesaplanmıştır.

**Tablo 3.** 2022 yılı için karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1372	0.0699	0.1178	0.0929	0.1718	-141.5637	0.9431	0.0977
DOAS	0.4541	0.1834	0.4213	0.0810	0.3248	-14.8321	0.4844	0.1224
FROTO	0.4140	0.1992	0.2562	0.1113	0.8938	-24.3863	1.0277	0.1495
KARSN	-0.1247	-0.0715	-0.0994	-0.1504	-0.2546	-265.0756	-3.5888	-0.1504
OTKAR	-0.1803	-0.1274	-0.1496	-0.1877	-0.8573	-180.5130	-1.4550	-0.1357
TMSN	0.3554	0.1712	0.3365	0.1519	0.3485	-40.3990	0.9790	0.1519
TOASO	0.4661	0.3010	0.4181	0.1819	1.0741	-70.1272	1.4193	0.2298
TTRAK	2.0756	1.3866	1.8831	0.8761	5.2581	-80.9996	6.4386	1.1766

**Tablo 4.** 2021 yılı için karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.2507	0.1088	0.1772	0.1465	0.2818	-85.2975	1.8562	0.1465
DOAS	0.6426	0.3351	0.6049	0.1345	0.7514	-39.0302	1.4017	0.1592
FROTO	0.4187	0.2034	0.2666	0.1224	0.8574	-35.2016	0.9888	0.1727
KARSN	0.0533	0.0305	0.0415	0.0543	0.1152	-258.5382	1.1527	0.0543
OTKAR	0.3341	0.1591	0.2121	0.2113	0.6365	-63.3733	0.9148	0.3000
TMSN	-0.0259	-0.0108	-0.0215	-0.0195	-0.0218	-8.5158	-0.4328	-0.0195
TOASO	0.1948	0.1142	0.1512	0.0903	0.4667	-83.6076	0.8168	0.1408
TTRAK	2.5845	1.4240	2.1433	0.7473	4.2428	-22.5110	6.5825	1.0544

**Tablo 5.** 2020 yılı için karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.2061	0.1101	0.1569	0.1712	0.3695	-109.6862	15.6250	0.1712
DOAS	0.1507	0.0946	0.1394	0.0356	0.2944	-17.6462	0.6493	0.0358
FROTO	0.5922	0.3035	0.4271	0.1495	1.0493	-41.3454	1.7619	0.1716
KARSN	0.3932	0.1599	0.2190	0.2508	0.5923	-58.2318	21.3990	0.2508
OTKAR	-0.0244	-0.0120	-0.0156	-0.0178	-0.0515	-32.6591	-0.0839	0.0509
TMSN	0.1649	0.0521	0.1205	0.0905	0.0918	-62.8241	1.2852	0.0905
TOASO	0.1456	0.0813	0.1056	0.0672	0.3544	-80.8559	0.8879	0.1182
TTRAK	3.6499	1.6095	2.3456	1.1839	5.1291	-38.1660	9.5245	1.3593

**Tablo 6.** 2019 yılı için karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.4355	0.2367	0.3685	0.2622	0.6614	-83.0942	17.1147	0.2622
DOAS	0.4232	0.2806	0.3827	0.1330	1.0514	-63.3218	17.2237	0.1467
FROTO	0.3479	0.1833	0.2562	0.0767	0.6448	-31.9134	1.5355	0.1095
KARSN	-0.0140	-0.0077	-0.0103	-0.0102	-0.0307	-123.9654	-1.0667	-0.0102
OTKAR	0.4088	0.1584	0.2080	0.1746	0.6650	49.0026	1.2068	0.2042
TMSN	0.0216	0.0065	0.0161	0.0215	0.0108	-142.2103	-0.2297	0.0215
TOASO	0.5970	0.2855	0.4313	0.1935	0.8448	-76.4007	2.4676	0.2401
TTRAK	2.7470	1.0316	1.3978	0.7903	3.9372	-7.1770	26.8571	1.1277

**Tablo 7.** 2018 yılı için karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	-0.0020	-0.0011	-0.0017	-0.0015	-0.0033	-82.9535	0.0224	-0.0015
DOAS	0.3365	0.2358	0.3236	0.1059	0.8691	-54.8952	8.5083	0.1193
FROTO	0.3014	0.1650	0.2342	0.0654	0.5590	-30.3520	1.2929	0.1015
KARSN	0.0384	0.0202	0.0235	0.0283	0.1456	-167.1829	-2.0385	0.0283
OTKAR	0.3230	0.1218	0.1466	0.1670	0.7190	108.6794	1.7066	0.2087
TMSN	-0.3660	-0.1539	-0.3526	-0.2625	-0.2731	-39.6464	4.9189	-0.2625
TOASO	0.2193	0.1028	0.1438	0.0719	0.3607	-71.0661	1.0053	0.1149
TTRAK	2.0111	0.7035	0.8914	0.5567	3.3374	32.7352	9.0667	0.8647

#### 4.1. Oyun-Teorik Bulanık Değerlendirme Sistemi (G-FES)

**Adım 1:** Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7’de verilen farklı yıllara ait karar matrisleri, (2) eşitliğiyle birbirlerinden bağımsız olarak normalize edilmiştir. Örneğin, Tablo 2’de verilen finansal oran değerleri normalize edildiğinde 2022 yılı için normalize edilmiş karar matrisi Tablo 8’deki gibi bulunmuştur. Böylece kriterler birlikte analiz edilebilir hale getirilmiştir. Normalize edilmiş değeri 1 olan alternatif, ilgili kriter bazında en iyi performansa sahiptir. Normalize edilmiş değeri 0 olan alternatif, ilgili kriter bazında en kötü performansa sahiptir.

**Tablo 8.** 2022 yılı için normalize edilmiş karar matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1407	0.1303	0.1315	0.2638	0.1683	0.5064	0.4520	0.1869
DOAS	0.2812	0.2053	0.2809	0.2526	0.1933	0.0000	0.4062	0.2056
FROTO	0.2634	0.2157	0.1997	0.2811	0.2863	0.0382	0.4604	0.2260
KARSN	0.0246	0.0369	0.0247	0.0351	0.0985	1.0000	0.0000	0.0000
OTKAR	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6621	0.2128	0.0111
TMSN	0.2375	0.1972	0.2391	0.3193	0.1972	0.1022	0.4555	0.2278
TOASO	0.2866	0.2829	0.2793	0.3475	0.3158	0.2210	0.4994	0.2866
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2644	1.0000	1.0000

**Adım 2:** i. alternatif- j. kriter ikilisi için  $(c_{ij}, d_{ij}, e_{ij})$  üçgensel bulanık sayısıyla verilen bulanık faydayı belirlemek için söz konusu ikilinin 2018-2022 dönemindeki normalize değerlerinin minimumu Tablo 9'daki gibi bulunmuştur ve  $c_{ij}$  parametresi olarak atanmıştır. Buna göre  $C_{n \times m} = (c_{ij})$  matrisi Tablo 9'daki gibidir. C matrisi her bir alternatif- kriter ikilisi için 2018-2022 dönemindeki en kötü normalize edilmiş değeri göstermektedir.

**Tablo 9.** 2018-2022 dönemi için normalize değerlerin minimum değerleri.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.0627	0.0753	0.0731	0.1573	0.0712	0.3071	0.1856	0.1023
DOAS	0.0477	0.0657	0.0656	0.0445	0.0668	0.0000	0.0341	0.0000
FROTO	0.1311	0.1493	0.1331	0.1086	0.1702	0.0382	0.0859	0.1026
KARSN	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4410	0.0000	0.0000
OTKAR	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0111
TMSN	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TOASO	0.0463	0.0575	0.0513	0.0708	0.0784	0.2210	0.0452	0.0623
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0560	0.4473	1.0000

i. alternatif- j. kriter ikilisinin 2018-2022 dönemindeki normalize değerlerinin medyanı Tablo 10'daki gibi bulunmuştur ve  $d_{ij}$  parametresi olarak atanmıştır. Buna göre  $D_{n \times m} = (d_{ij})$  matrisi Tablo 10'daki gibidir. D matrisi her bir alternatif- kriter ikilisi için 2018-2022 dönemindeki merkezi eğilimi göstermektedir.

**Tablo 10.** 2018-2022 dönemi için normalize değerlerin medyan değerleri.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1407	0.1303	0.1315	0.2638	0.0813	0.6908	0.4520	0.1869
DOAS	0.2561	0.2411	0.2809	0.2008	0.1933	0.1220	0.4062	0.1664
FROTO	0.1703	0.1946	0.1893	0.1850	0.2125	0.2575	0.2026	0.1790
KARSN	0.0304	0.0369	0.0291	0.0962	0.0985	1.0000	0.0000	0.0687
OTKAR	0.1379	0.1184	0.1079	0.2308	0.1544	0.1631	0.1921	0.1884
TMSN	0.0129	0.0136	0.0187	0.0396	0.0104	0.4909	0.0637	0.0279
TOASO	0.2213	0.2821	0.2793	0.2545	0.1755	0.6516	0.1781	0.2200
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2644	1.0000	1.0000

i. alternatif- j. kriter ikilisinin 2018-2022 dönemindeki normalize değerlerinin maksimumu Tablo 11'deki gibi bulunmuştur ve  $e_{ij}$  parametresi olarak atanmıştır. Buna göre  $E_{n \times m} = (e_{ij})$  matrisi Tablo 11'deki gibidir. E matrisi her bir alternatif- kriter ikilisi için 2018-2022 dönemindeki en iyi normalize edilmiş değeri göstermektedir.



**Tablo 11.** 2018-2022 dönemi için normalize değerlerin maksimum değerleri.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1628	0.2351	0.2821	0.3403	0.1744	1.0000	0.7312	0.2394
DOAS	0.2955	0.4545	0.5435	0.4497	0.3164	0.5930	0.9497	0.3387
FROTO	0.2807	0.3720	0.4717	0.4002	0.2863	0.5040	0.4604	0.3230
KARSN	0.1701	0.2031	0.3023	0.3550	0.1243	1.0000	1.0000	0.2580
OTKAR	0.2899	0.3215	0.4013	0.5244	0.2748	0.6621	0.3372	0.4181
TMSN	0.2375	0.1972	0.2391	0.3193	0.1972	1.0000	0.6265	0.2278
TOASO	0.2866	0.2994	0.3991	0.4082	0.3158	0.6868	0.4994	0.3348
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2938	1.0000	1.0000

**Adım 3:** (3) eşitliği kullanılarak bulanık ortalama matrisi (M) Tablo 12'deki gibi bulunmuştur. Burada  $M = (C+4D+E)/6$  eşitliği geçerlidir. Örneğin, AKSEN- K1 ikilisi için bulanık ortalama 0.1314 olarak bulunmuştur.

**Tablo 12.** Bulanık ortalama matrisi (M).

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1314	0.1386	0.1469	0.2588	0.0951	0.6784	0.4541	0.1816
DOAS	0.2279	0.2474	0.2888	0.2162	0.1927	0.1802	0.4348	0.1674
FROTO	0.1822	0.2166	0.2270	0.2082	0.2178	0.2620	0.2261	0.1902
KARSN	0.0486	0.0585	0.0698	0.1233	0.0864	0.9068	0.1667	0.0888
OTKAR	0.1402	0.1325	0.1388	0.2413	0.1487	0.2191	0.1843	0.1971
TMSN	0.0482	0.0420	0.0523	0.0796	0.0398	0.4939	0.1469	0.0566
TOASO	0.2030	0.2476	0.2613	0.2495	0.1827	0.5857	0.2095	0.2128
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.2346	0.9079	1.0000

**Adım 4:** (4) eşitliği kullanılarak bulanık standart sapma matrisi (S) Tablo 13'teki gibi bulunmuştur. Örneğin, AKSEN- K1 ikilisi için bulanık standart sapma 0.1913 olarak bulunmuştur. Tüm elemanları 1 olan ve n satır, m sütundan oluşan matris  $O_{n \times m}$  olmak üzere  $S = (O-C)/2\sqrt{6}$  eşitliği geçerlidir.

**Tablo 13.** Bulanık standart sapma matrisi (S).

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
ASUZU	0.1913	0.1888	0.1892	0.1720	0.1896	0.1414	0.1662	0.1832
DOAS	0.1944	0.1907	0.1907	0.1950	0.1905	0.2041	0.1972	0.2041
FROTO	0.1774	0.1737	0.1770	0.1820	0.1694	0.1963	0.1866	0.1832
KARSN	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.1141	0.2041	0.2041
OTKAR	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2019
TMSN	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041	0.2041
TOASO	0.1947	0.1924	0.1937	0.1897	0.1881	0.1590	0.1949	0.1914
TTRAK	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1927	0.1128	0.0000

**Adım 5:** (5) eşitliğiyle ödemeler matrisi (P),  $w = 0$  için  $P = -S$  olarak,  $w = 0.5$  için  $P = (M-S)/2$  olarak ve  $w = 1$  için  $P = M$  olarak bulunur.

**Adım 6:** Adım 5'te elde edilen her bir P matrisi için (6)'daki doğrusal en iyileme problemi ayrı ayrı çözümlenerek alternatiflerin öncelik değerleri Tablo 14'teki gibi tek olarak elde edilmiştir. Örneğin,  $w = 0$  iken yani riskten kaçınma derecesi en yüksek iken ASUZU'nun önceliği 0.7630 olarak bulunmuştur.

**Tablo 14.** Alternatiflerin öncelik değerleri.

	w = 0	w = 0.5	w = 1
ASUZU	0.7630	0.1473	0
DOAS	0	0	0
FROTO	0	0	0
KARSN	0	0.3824	0.4714
OTKAR	0	0	0
TMSN	0	0	0
TOASO	0	0	0
TTRAK	0.2370	0.4703	0.5286

(7)'deki doğrusal en iyileme problemi çözülerek kriterlerin ağırlıkları Tablo 15'teki gibi tek olarak elde edilmiştir. Görüldüğü üzere G-FES ile elde edilen sonuçlar ve kriterlerin objektif bir şekilde belirlenen ağırlıkları, belirlenen riskten kaçınma derecesine (w) bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, w = 0 iken yani riskten kaçınma derece en yüksek iken K1'in ağırlığı 0 olarak bulunmuştur.

**Tablo 15.** Kriterlerin ağırlıkları.

	w = 0	w = 0.5	w = 1
K1	0	0.0569	0.4140
K2	0	0	0
K3	0	0	0
K4	0	0	0
K5	0	0	0
K6	0.5103	0.5374	0.5860
K7	0.4897	0.4057	0
K8	0	0	0

**Adım 7:** Tablo 14'te verilen bilgiler doğrultusunda şu bilgiler verilebilir. Sıralaması verilmeyen alternatifler nispeten düşük performanslıdır ve bunların sıralaması aynıdır.

- w = 0 iken yani riskten kaçınma derecesi en yüksek iken en iyi alternatifler sırasıyla ASUZU ve TTRAK olarak bulunmuştur. Bu bilgilerle portföy oluşturulursa ASUZU ve TTRAK hisse senetlerinin ağırlıkları sırasıyla %76,30 ve %23.70 olarak belirlenir.
- w = 0.5 iken yani riskten kaçınma derecesi orta düzey iken en iyi alternatifler sırasıyla TTRAK, KARSN ve ASUZU olarak bulunmuştur. Bu bilgilerle portföy oluşturulursa TTRAK, KARSN ve ASUZU hisse senetlerinin ağırlıkları sırasıyla %47.03, %38.04 ve %14.73 olarak bulunur.
- w = 1 iken yani risk nötr karar verici için en iyi alternatifler sırasıyla TTRAK ve KARSN olarak bulunmuştur. Bu bilgilerle portföy oluşturulursa TTRAK ve KARSN hisse senetlerinin ağırlıkları sırasıyla %52.86 ve %47.14 olarak bulunur.

## 4.2. İki Aşamalı Hibrit Yaklaşım

**Aşama 1:** Eşit ağırlıklı TOPSIS yöntemiyle 2018-2022 dönemindeki her bir yıl için alternatiflerin sıralaması Tablo 16'daki gibi bulunmuştur. Örneğin, 2022 yılında bu yöntemle göre ASUZU altıncı sıradadır.

**Tablo 16.** Eşit ağırlıklı TOPSIS yöntemiyle elde edilen sıralama matrisi (R).

	2022	2021	2020	2019	2018
ASUZU	6	5	3	2	7
DOAS	5	3	7	3	2
FROTO	3	6	4	7	5
KARSN	7	2	2	6	4
OTKAR	8	4	8	8	6
TMSN	4	8	6	5	8
TOASO	2	7	5	4	3
TTRAK	1	1	1	1	1

**Aşama 2a:** (8) eşitliği kullanılarak hesaplanan ödemeler matrisi (P) Tablo 17’de sunulmuştur.

**Tablo 17.** Ödemeler matrisi (P).

	2022	2021	2020	2019	2018
ASUZU	0.2857	0.4286	0.7143	0.8571	0.1429
DOAS	0.4286	0.7143	0.1429	0.7143	0.8571
FROTO	0.7143	0.2857	0.5714	0.1429	0.4286
KARSN	0.1429	0.8571	0.8571	0.2857	0.5714
OTKAR	0.0000	0.5714	0.0000	0.0000	0.2857
TMSN	0.5714	0.0000	0.2857	0.4286	0.0000
TOASO	0.8571	0.1429	0.4286	0.5714	0.7143
TTRAK	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

**Aşama 2b:** (6b)’deki doğrusal en iyileme problemi çözüldüğünde TTRAK için önceliğin 1 olduğu, diğerleri için önceliklerin 0 olduğu görülmüştür. (7)’deki doğrusal en iyileme problemi çözüldüğünde 2018-2022 dönemindeki her bir yılın ağırlığının 0.20’ye eşit olduğu bulunmuştur.

**Aşama 2c:** Aşama 2b’deki bilgiler doğrultusunda TTRAK en iyi alternatiftir. Diğer alternatifler nispeten düşük performanslıdır ve bunların sıralaması aynıdır.

## 5. Tartışma ve Sonuç

Dünya ve Türkiye için önde gelen sektörlerden biri konumunda olan otomotiv sektörünün ve sektörü temsil eden firmaların son dönemde pandemi nedeni ile, pandemi sonrası küresel düzeylerde yaşanan makroekonomik sorunlar nedeniyle performans analizlerinin yapılması önem arz etmektedir. Sektör, yaşanan üretim kesintileri, önemli bir istihdam alanına sahip olması, elektrikli araç üretimi gibi sektöre özgü yenilikler nedeniyle dinamik bir konumdadır. Bu nedenle nakit akım temelli performans ölçümlerinin de finansal performans ölçümü kapsamında dikkate alınması firmalar için daha sağlıklı bir planlama ve değerlendirme yapmayı sağlamaktadır. Bu bağlamda bu çalışmada bir bulanık ÇKKV yaklaşımı (G-FES) ve TOPSIS temelli iki aşamalı hibrit yaklaşım kullanılarak BIST otomotiv sektörü firmalarının finansal performans ölçümü 2018-2022 dönemi için yapılmıştır.

Her bir alternatifin (firmanın) öncelik değeri arttıkça firmanın nakit akım temelli finansal performansı artmaktadır. Riskten kaçınma derecesi ise  $w$  değeri arttıkça azalmaktadır. G-FES sonuçlarına göre tüm  $w$  değerleri için pozitif önceliğe sahip tek firma TTRAK olarak bulunmuştur. Eşit ağırlıklı TOPSIS sonuçlarına göre TTRAK, tüm yıllarda nakit akım temelli finansal performans analizinde birinci sıradadır. Öte yandan özellikle riskten kaçınma derecesi yüksek iken yani  $w$  değeri sıfıra yakinken, bu bilgi G-FES ile bulunan sonuçlar için geçerli değildir. Çünkü K6 kodlu nakit dönüş süresi kriteri için bu firma düşük performansa sahiptir ve G-FES tanımı gereği, alternatiflerin herhangi bir ağırlık portföyünü ( $x$ ) en zayıf olduğu kriter ağırlık vektörüyle ( $y$ ) değerlendirilmektedir.

Yapılan analizin sonucunda; 2018-2022 döneminde nispeten yüksek performanslı firmaların ASUZU, KARSN ve TTRAK olduğu görülmüştür. Öte yandan bunların kendi içindeki sıralaması riskten kaçınma derecesine bağlı olarak değişmektedir. En az bir  $w$  değeri için pozitif ağırlığa sahip olan kriterler K1 kodlu nakit oranı kriteri, K6

kodlu nakit dönüş süresi kriteri ve K7 kodlu kazanç-kar kalitesi oranı kriteri olarak bulunmuştur. Riskten kaçınma derecesi arttıkça; K1, K6'nın ağırlığı ve KARSN, TTRAK için öncelik değerleri azalmaktadır. K7 ve ASUZU için bu durumun tersi geçerlidir. Ağırlığı pozitif olan kriterler firmaların zayıf noktaları ile ilişkili olduğundan, analizin sonuçlarına göre en iyi firmaları (ASUZU, KARSN ve TTRAK) söz konusu kriterler bazında incelemek yararlı olabilir. Buna göre, K1 için ASUZU ve KARSN, K6 için TTRAK, K7 için KARSN düşük performanslıdır.

DOAS, FROTO, OTKAR, TMSN ve TOASO nakit akım temelli finansal performans açısından nispeten geridedir. Bu nedenle bu firmaların yöneticilerinin tüm kriterler bazında firmalarını değerlendirmeleri ve gerekli aksiyonları almaları önerilmektedir. K1 kodlu nakit oranı kriteri, kısa vadeli borç ödemede nakit esaslı olarak kaynak oluşturma gücünü gösterir. Bu kritere göre düşük performansla sahip olunması kısa vadeli borçlarını ödemede işletme faaliyetlerinden sağlanan nakit dışında fonlara ihtiyaç olduğunu gösterir. K6 kodlu nakit dönüş süresi kriteri firmalarda gün cinsinden nakit dönüşünün süresini gösterir. Bu sürenin uzaması firmalarının nakde ulaşma sürelerinin arttığını ve firmaların borçlanma ihtiyacının artacağını gösterir. K7 kodlu kazanç-kar kalitesi oranı kriteri net karın ne kadarının işletme faaliyetlerinden nakit olarak elde edildiği gösterir. Bu oranın düşük olması karın nakde dönüşünde firmada sorun yaşandığı gösterir. Nakit akım temelli finansal performanslarını artırmak için ASUZU, KARSN ve TTRAK firmalarının yöneticilerinin ilgili kriterler bazında firmalarını değerlendirmeleri ve gerekli aksiyonları almaları önerilmektedir.

G-FES ile yapılan analizin güçlü yanı beş yıllık dönemi bütün olarak değerlendirmesidir. Bu çalışmada yöntem olarak verilerin minimum, medyan ve maksimum değerlerinin dikkate alınmasına izin veren G-FES seçildiğinden, finansal performans analizine bütüncül bir bakış açısı getirilmiştir ve bilimsel yazındaki boşluk doldurulmuştur. Öte yandan bilimsel yazında benzer çalışma bulunmadığından elde edilen bulguların karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Bu analizin zayıf yanları; her bir yıl için ayrı ayrı sonuçların bulunamaması ve düşük performanslı alternatiflerin birbirlerinden ayırt edilememesidir. G-FES, alternatiflerin herhangi bir ağırlık vektörü (x) için kriterlerin en düşük ödemeye neden olan ağırlık vektörünü (y) dikkate alır. Bu nedenle bu çalışmada yapılan finansal performans analizi en kötü durum odaklıdır ve bir zincirin en zayıf halkası kadar güçlü olduğunu varsaymaktadır. Oyun teorisi karar vermede güçlü bir araç olduğundan, bu varsayım ile yapılacak analizlerde G-FES'in iyi bir tercih olacağı düşünülmektedir. Bu varsayım geçerli değilse TOPSIS gibi sonuçları büyük oranda kriter ağırlıklandırılmaya bağlı olan yöntemler önerilmektedir.

### Araştırmacıların Katkısı

Araştırmannın yazarları araştırmanın tüm süreçlerine eşit derecede katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Ayıkoglu Zaif, F., & Karapınar, A. (2021). Covid 19 sürecinin otomotiv sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal tabloları üzerine etkisinin halka açık işletmeler üzerinden incelenmesi. İçinde *Covid 19 Salgınının İşletmelerin Finansal Tabloları Üzerine Etkisine İlişkin Araştırma Sonuçlarının Değerlendirilmesi* (s. 502-518), Gazi Kitabevi.

Başar, B., & Azgın, N. (2016). İşletme performansının ölçülmesinde nakit akış analizlerinin esasları ve Borsa İstanbul perakende sektöründe bir araştırma. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 23, 779-804. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/adyusbd/issue/24305/257590>

Bozkır, B., & Ataman Gökçen, B. (2023). BİST perakende şirketlerinin TMS 7 nakit akış tablosu kapsamında finansal performanslarının GRI ilişkisel analiz yöntemi ile ölçülmesi. *Muhasebe Bilim Dünyası Dergisi*, 25(2), 236-255. <https://doi.org/10.31460/mbdd.1149326>

Carlsson, C., Fullér, R., & Majlender, P. (2002). A possibilistic approach to selecting portfolios with highest utility score. *Fuzzy Sets and Systems*, 131(1), 13-21. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(01\)00251-2](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(01)00251-2)

Cavlak, H., Cebeci, Y., & Güneş, N. (2017). Nakit akış tablolarının içerik analizi yöntemi ile değerlendirilmesi, *International Journal of Academic Value Studies*, 3(13), 234-246. <http://dx.doi.org/10.23929/javs.404>

Chakraborty, S. (2022). TOPSIS and Modified TOPSIS: A comparative analysis. *Decision Analytics Journal*, 2, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2021.100021>

Ege, İ., Topaloğlu, E.E., Karakozak, Ö. (2016). Nakit dönüşüm süresi analizi: BIST-50 endeksinde yer alan şirketler üzerine ampirik bir uygulama. *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 9(1), 179-193. <https://dergipark.org.tr/en/pub/niguiibfd/issue/19761/211598>

Gilpin, A., & Sandholm, T. (2008). Solving two-person zero-sum repeated games of incomplete information. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 903-910. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=30a661e1484f5fd7c13e2f0e9b81eab354575d4e>

Göktaş, F. & Gökerik, M. (baskıda). Sosyal medya reklam platformu seçimi için yeni bir oyun teorik yaklaşım. *Journal of Turkish Operations Management*.

Güleç, Ö. F., & Bektaş, T. (2019). Cash flow ratio analysis: The case of Turkey. *Muhasebe ve Finansman Dergisi*, Özel Sayı, 247-262. <http://doi.org/10.25095/mufad.606022>

Gürkan, S., & Büyükatık, E. (2021). Nakit akış oranları bazlı finansal performans analizi: BİST kimya petrol plastik endeks şirketleri üzerine bir araştırma. *Ekonomi Bilimleri Dergisi*, 13, 51- 71. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ebd/issue/64174/867477>

Kaplanoğlu, E., (2018). Aras ve Copras yöntemleriyle nakit akışına dayalı performans ölçümü: BIST kimya, petrol, kauçuk ve plastik ürünler sektöründe bir uygulama. *Muhasebe ve Vergi Uygulamaları Dergisi*, 11(2), 153-184. <https://doi.org/10.29067/muvu.340614>

Karami, A., & Johansson, R. (2014). Utilization of multi attribute decision making techniques to integrate automatic and manual ranking of options. *Journal of Information Science and Engineering*, 30(2), 519-534. <https://doi.org/10.6688/JISE.2014.30.2.14>

OICA (2022). Otomotiv sanayi derneği küresel değerlendirme raporu. 06.02.2024 tarihinde [www.osd.org.tr](http://www.osd.org.tr) adresinden erişildi.

Sakarya, Ş., & Akkuş, H. T. (2015). Finansal performansın ölçülmesinde geleneksel oranlar ile nakit akım oranlarının karşılaştırmalı analizi: BIST çimento şirketleri üzerine TOPSIS yöntemi ile bir uygulama. *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 17(1), 109-123. <https://doi.org/10.5578/jeas.9797>

Sakarya, Ş., & Saçkes, İ. (2022). BIST'e kayıtlı ulaştırma ve depolama sektöründe faaliyet gösteren şirketlerin finansal performanslarının Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) ve Gri İlişkisel Analiz (GİA) yöntemleriyle değerlendirilmesi. *İktisadi İdari ve Siyasal Araştırmalar Dergisi*, 7(19), 366-388. <https://doi.org/10.25204/iktisad.1088186>

Sakarya, Ş., & Erayman, Ç. (2022). Nakit akış tablosuna dayalı finansal oranlar ve Promethee yöntemi ile finansal performans analizi: BIST bilişim sektöründe bir uygulama. *Aksaray Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 51-78. <https://doi.org/10.38122/ased.1016352>

Sayılgan, G. (2013). *Soru ve yanıtlarıyla işletme finansmanı*. Siyasal Kitabevi.

TCMB (2024). Sektör bilançoları istatistikleri. 10.03.2024 tarihinde [www.tcmb.org.tr](http://www.tcmb.org.tr) adresinden erişildi.

TMS (2018). Türkiye muhasebe standartları. 06.02.2024 tarihinde [www.kgk.gov.tr](http://www.kgk.gov.tr) adresinden erişildi.

Tutkavul, K. (2018). Nakit akış oranları temelinde nakit akış tablosunun finansal analizi: otomotiv sektöründe bir uygulama. *İçinde Eurasian Conferences on Language & Social Sciences*, 87-118. [https://www.researchgate.net/publication/332413744\\_Nakit\\_Akis\\_Oranlari\\_Temelinde\\_Nakit\\_Akis\\_Tablosunun\\_Finansal\\_Analizi\\_Otomotiv\\_Sektorunde\\_Bir\\_Uygulama](https://www.researchgate.net/publication/332413744_Nakit_Akis_Oranlari_Temelinde_Nakit_Akis_Tablosunun_Finansal_Analizi_Otomotiv_Sektorunde_Bir_Uygulama)

Vafaei, N., Ribeiro, R. A., & Camarinha-Matos, L. M. (2016). Normalization techniques for multi-criteria decision making: Analytical hierarchy process case study. In *Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems*, 261-269. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4_26)

Vargün, H., & Uygurtürk, H. (2016). Finansal performans ölçüm aracı olarak nakit akım odaklı finansal analiz:

inşaat ve bayındırlık sektörü üzerine bir uygulama. *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, Özel Sayı, 358- 369. <https://dergipark.org.tr/en/pub/bsbd/issue/43860/539486>

Yılmaz, M. K., & İçten, O. (2018). Borsa İstanbul'da işlem gören gayrimenkul yatırım ortaklıklarının nakit akımı odaklı finansal performans analizi (2007-2016). *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, 55(635), 73-87. <https://dergipark.org.tr/en/pub/fpeyd/issue/47988/607082>