

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

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

Yıl:22 **Sayı:43** **2023-Bahar**
Year:22 **Vol:43** **2023-Spring**

Istanbul Commerce University
Journal of Science

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



İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

DERGİSİ

Yıl: 22

Sayı: 43

Bahar 2023

Year: 22

Volume: 43

Spring 2023

Istanbul Commerce University
Journal of Science



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

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



İstanbul Ticaret Üniversitesi Adına Sahibi <i>Owner on behalf of İstanbul Commerce University</i>	Prof. Dr. Ömer TORLAK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi Rektörü İstanbul Commerce University Rector</i>
Editör <i>Editor</i>	Doç. Dr. Berk AYVAZ <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Yardımcı Editör <i>Assistant Editor</i>	Arş. Gör. Kader ŞİMŞİR ACAR <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Alan Editörleri <i>Associate Editors</i>	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Prof. Dr. Doğan KAYA <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i> Doç. Dr. Muhammet CEYLAN <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Dil Editörü <i>Language Editor</i>	Dr. Öğr. Üyesi Elif NURAY YILDIRIM <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Sorumlu Yazı İşleri Müdürü <i>Publishing Manager</i>	Yasin DEMİRBAŞ <i>İstanbul Ticaret Üniversitesi</i>
Yönetim Yeri <i>Head Office</i>	İstanbul Ticaret Üniversitesi / İstanbul Commerce University
Yazışma Adresi <i>Corresponding Address</i>	Küçükyalı E-5 Kavşağı, İnönü Cad. No: 4 Küçükyalı-34840 İstanbul-TÜRKİYE Tel: 0 216 444 0 413 (3141) e-posta: fendergi@ticaret.edu.tr
İnternet Adresi <i>Web Address</i>	https://dergipark.org.tr/tr/pub/ticaretfbid
Yayın Türü <i>Publication Type</i>	Yerel Süreli / <i>Periodical</i> Yılda iki sayı yayımlanır: Bahar (Haziran) ve Güz (Aralık) <i>Two issues per year: Spring (June) and Fall (December)</i>
Yayın Dili <i>Publication Language</i>	Türkçe ve İngilizce <i>Turkish and English</i>
Online Yayınlanmaktadır <i>Published Online</i>	ISSN : 1305-7820 E-ISSN : 2587-165X
Derginin Tarandığı Kaynaklar	

Yayın Kurulu <i>Editorial Board</i>	Prof. Dr. Abdül Halim ZAIM	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Adnan ÇALIK	Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye
	Prof. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Qamrul Hasan ANSARI	Aligarh Muslim University, Aligarh, India
	Prof. Dr. Vatan KARAKAYA	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye
	Doç. Dr. Muhammet CEYLAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Ali Osman KUŞAKCI	İbn Haldun Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
Danışma Kurulu <i>Advisory Board</i>	Prof. Dr. Abdül Halim ZAIM	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Adnan ÇALIK	Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye
	Prof. Dr. Ahmet Şükrü ÖZDEMİR	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Akram BEGMATOV	Semerkant Devlet Üniversitesi, Semerkant, Özbekistan
	Prof. Dr. Ali FARAJZADEH	Razi Üniversitesi, Kermanshah, İran
	Prof. Dr. Ali ÜNÜVAR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Aslan GÜLCÜ	Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye
	Prof. Dr. Bayram Ali ERSOY	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Bilal BİLALOV	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Doğan KAYA	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Emrah Evren KARA	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye
	Prof. Dr. Farman MAMEDOV	Azerbaycan Milli İlimler Akademisi, Bakü, Azerbaycan
	Prof. Dr. Fatih NURAY	Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, Türkiye
	Prof. Dr. Habip DAYIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Hasan GENÇ	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye
	Prof. Dr. Heybetkulu S. MUSTAFAYEV	Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye
	Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. İdris KABALCI	Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye
	Prof. Dr. İsmail KÜÇÜK	İstanbul Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Metin BAŞARIR	Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye
	Prof. Dr. Metin GÜMÜŞ	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mikail ET	Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
	Prof. Dr. Muammer KALYON	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Murat KOCA	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye
	Prof. Dr. Murat KİRİŞÇİ	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Murat SARI	İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Mustafa KURT	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. M. Emin ÖZDEMİR	Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye
	Prof. Dr. Necip ŞİMŞEK	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Nedim TUTKUN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Oğuz BORAT	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Orhan İÇELLİ	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Rifat YAZICI	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. S. Ahmet OYMAK	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Serhan YARKAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Sibkat KAÇTIOĞLU	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Ünal Halit ÖZDEN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Vatan KARAKAYA	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Kırşehir, Türkiye
	Prof. Dr. Yasin ÜST	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Prof. Dr. Yusuf ZEREN	Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Abdullah DEMİR	Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Ali Osman KUŞAKCI	İbn Haldun Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
	Doç. Dr. Asif YOKUŞ	Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
Doç. Dr. Faik GÜRSOY	Adıyaman Üniversitesi, Adıyaman, Türkiye	
Doç. Dr. Fatih ÖZTÜRK	İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Fuat USTA	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye	
Doç. Dr. İbrahim DEMİR	Türkiye İstatistik Kurumu, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Kadri DOĞAN	Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin, Türkiye	
Doç. Dr. Leyla SURİ	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Merve İLKHAN KARA	Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye	
Doç. Dr. Muhammet CEYLAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	
Doç. Dr. Yunus ATALAN	Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye	
Dr. Öğr. Üyesi M. Alper ÖZPINAR	İstanbul Ticaret Üniversitesi, İstanbul, Türkiye	

43. Sayı HAKEM LİSTESİ / REVIEWER LIST

Prof. Dr. Güfem TUZKAYA	Marmara Üniversitesi
Prof. Dr. Halit ÖZEN	Yıldız Teknik Üniversitesi
Prof. Dr. Namık YENER	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Prof. Dr. Nursel ÖZTÜRK	Uludağ Üniversitesi
Prof. Dr. Rana KUTLU	İstanbul Kültür Üniversitesi
Prof. Dr. Serol BULKAN	Marmara Üniversitesi
Doç. Dr. Ali Osman KUSAKCI	İbn Haldun Üniversitesi
Doç. Dr. Berk Ayvaz	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Doç. Dr. Erdem YAVUZ	Bursa Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Hüseyin Arda ÜLKÜ	Yeditepe Üniversitesi
Doç. Dr. İsmail TOPCU	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi
Doç. Dr. Muhammed Ali AYDIN	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Doç. Dr. Mustafa Cem KASAPBAŞI	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Doç. Dr. Özgü CAN	Ege Üniversitesi
Doç. Dr. Özlem SÜMENGİN	Erciyes Üniversitesi
Doç. Dr. Selçuk ALP	Yıldız Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Seval GENÇ	Marmara Üniversitesi
Doç. Dr. Zerrin Funda ÜRÜK	İstanbul Nişantaşı Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Akif ONUR	İstanbul Arel Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Aybala USTA YILDIRIM	Marmara Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Bilçen MUTLU MİTİL	Marmara Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emine BAKAN	Uşak Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Emine Elif NEBATİ	İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Filiz YILDIZ	Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Esad ERGİN	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Makbule Tuba BASKAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Rıza ADALI	Sakarya Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Metin TURAN	İstanbul Ticaret Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Önder ŞAHİNASLAN	Maltepe Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Tülin ÇETİN	Manisa Celâl Bayar Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep TURGUT AKGÜN	İstanbul Medeniyet Üniversitesi
Dr. Nedim ALİCİ	Sinop Üniversitesi
Dr. Veysel TATAR	Artvin Çoruh Üniversitesi

EDİTÖRDEN

Değerli İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Okurları,

Dergimizin 22. yılına girmişken, 2023 Bahar döneminde yayımlanan 43. sayıyı değerli okurlara ulaştırmaktan onur duymaktayız.

Dergimizin bu sayısında Bilgisayar Mühendisliği, Tekstil Mühendisliği, Endüstri Mühendisliği, İç Mimarlık, Sistem Mühendisliği, İnşaat Mühendisliği, Makine Mühendisliği, Malzeme Mühendisliği, Elektrik-Elektronik Mühendisliği ve Biyomedikal alanlarından on beş makaleyi siz okurlarımızın istifadesine sunmaktan mutluyuz.

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

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

Doç. Dr. Berk AYVAZ
Fen Bilimleri Dergisi Editörü

EDITORIAL POST

Dear Readers of İstanbul Commerce University Journal of Science,

In the 22nd year of our journal, we are honored to share with you our esteemed readers the 43rd issue of the Spring 2023 edition.

In this issue, we are pleased to publish fifteen articles from the fields of Computer Engineering, Textile Engineering, Industrial Engineering, Interior Architecture, Systems Engineering, Civil Engineering, Mechanical Engineering, Materials Engineering, Electrical-Electronic Engineering and Biomedical to the readers.

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

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

Assoc. Prof. Dr. Berk AYVAZ
Editor

YAYIN POLİTİKASI

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

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

Dergimize gönderilen makaleler için değerlendirme aşamaları aşağıdaki gibidir;

1. Makale Ön İncelemeye alınır;

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

2. Makale Değerlendirme aşamasına geçer.

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

3. Mizanpaj aşamasında, düzeltmeler gerekirse yazardan istenir.

4. Süreç tamamlanır ve yazara bilgilendirme mesajı gönderilir.

Makale kabul süreci ortalama 3 ay sürmektedir.

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

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

PUBLICATION POLICY

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

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

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

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

The article review process is almost 3 months.

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

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



İÇİNDEKİLER / CONTENTS

Araştırma Makaleleri / Research Articles

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

BLOKZİNCİRİ TABANLI AKILLI HAVA MÜHİMMATI LOJİSTİK TAKİP SİSTEMİ 1

BLOCKCHAIN-BASED INTELLIGENT AIR AMMUNITION LOGISTICS TRACKING SYSTEM
Enis KONACAKLI, Can EYÜPOĞLU

BALKÜPLERİNİN SALDIRI VE SAVUNMA AÇISINDAN İNCELENMESİ 15

EXAMINATION OF HONEYPOTS FROM OFFENSIVE AND DEFENSIVE PERSPECTIVE
Muhammed Sadık KARABAY, Can EYÜPOĞLU

Tekstil Mühendisliği / Textile Engineering

MEŞE PALAMUDUNDAN ELDE EDİLEN DOĞAL BOYARMADDE İLE PAMUK KUMAŞIN BOYANMASINA FARKLI MORDAN MADDELERİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI 33

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT MORDANT AGENTS ON DYEING OF COTTON FABRIC WITH NATURAL DYE OBTAINED FROM GALLNUT
Nigar MERDAN, Şeyda EYÜPOĞLU

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

ŞANS KISITLI VERİ ZARFLAMA ANALİZİ İLE ETKİNLİK ÖLÇÜMÜ: HAVALİMANI ÖRNEĞİ 44

EFFICIENCY MEASUREMENT WITH CHANCE CONSTRAINED DATA ENVELOPMENT ANALYSIS: AIRPORT EXAMPLE
Elif DERE, Berk AYVAZ

ÜRETİM PLANLAMADA BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA YÖNTEMİ: METAL SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA 67

FUZZY LINEAR PROGRAMMING METHOD IN PRODUCTION PLANNING: AN APPLICATION IN THE METAL INDUSTRY
Dilara ÖZÜLKÜ, Sibkat KAÇTIOĞLU

DEĞER AKIŞI HARİTALAMA YÖNTEMİYLE OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE FAALİYET GÖSTEREN BİR FİRMANIN TESLİMAT SÜRESİNİN AZALTILMASI 94

REDUCING THE DELIVERY TIME OF A COMPANY OPERATING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY BY VALUE STREAM MAPPING METHOD
İrem DÜZDAR ARGUN, Senanur ÇELİK

İç Mimarlık / Interior Architecture

- İÇ MEKÂN TASARIMINDA RENK VE BİÇİMİN ETKİNLİĞİ** 113
THE ACTIVITY OF COLOR AND FORMAT IN INTERIOR DESIGN
Elif Selin ATEŞ, Yaprak ÖZEL

- AYDINLATMA SİSTEMLERİNİN YENİLENME GEREKSİNİMLERİ** 124
RENEWAL REQUIREMENTS OF LIGHTING SYSTEMS
Faruk UYAN, Alpin KÖKNEL YENER

Sistem Mühendisliği / Systems Engineering

- TOPLU ULAŞIMDA YENİLİKÇİ GARAJ İŞLETTİRME MODELİ İÇİN ELEKTRİKLİ OTOBÜS KONSEPTİ** 139
ELECTRIC BUS CONCEPT ON INNOVATIVE GARAGE OPERATING BY OUTSOURCE MODEL FOR PUBLIC TRANSPORT
Orhan TOPAL

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

- KENT İÇİ ULAŞIM PROJELERİNDE MİKROSİMÜLASYON YÖNTEMİNİN KULLANILMASI: ESENYURT AHMET ARİF CADDESİ ÖRNEĞİ** 152
USING MICROSIMULATION METHOD IN URBAN TRANSPORTATION PROJECTS: THE CASE OF ESENYURT AHMET ARİF CADDESİ
Menekşe ŞEKER MURAT, Leyla SURİ

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

- CO₂ AKIŞKANININ KAYNAMALI AKIŞ REJİMİNDE ISI TRANSFERİ KATSAYISININ ÇOKLU REGRESYON YÖNTEMİ İLE TAHMİNLENMESİ** 179
PREDICTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CO₂ IN FLOW BOILING REGIME USING MULTIPLE REGRESSION METHOD
Ahmet KORKMAZ, Semih ÖZEL, Mehmed Rafet ÖZDEMİR

Malzeme Mühendisliği / Materials Engineering

- ELEKTROMANYETİK KİRLİLİK ORTAMINDA KAOLİNİT/PVA KOMPOZİTLERİN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ÖZELLİKLERİ** 194
ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECT PROPERTIES OF KAOLINITE/PVA COMPOSITE IN ELECTROMAGNETIC POLLUTION ENVIRONMENT
Ethem İlhan ŞAHİN, Mehriban EMEK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

- REVISITING MODE CONVERSION BETWEEN TRANSMISSION LINES FOR WIDE-BAND MODELING OF DEFECTED GROUND STRUCTURES** 205
KUSURLU TOPRAK YAPILARININ GENİŞ BANTLI MODELLENMESİ İÇİN İLETİM HATLARI ARASINDAKİ MOD DÖNÜŞÜMÜNÜN TEKRAR İNCELENMESİ
Seyit Ahmet SİS, Fatih ÜSTÜNER

Derleme Makaleler / Review Articles

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

SIFIR GÜVEN AĞ ERİŞİM MİMARİSİNDE KULLANICI GÜVENLİĞİNİN SAĞLANMASI **215**

USER IN ZERO TRUST NETWORK ACCESS ARCHITECHTURE ENSURING SECURITY

Abbas BULUT, Muhammed Ali AYDIN, Abdül Halim ZAIM

Biyomedikal / Biomedical

ROBOTİK CERRAHİ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ **233**

INVESTIGATION OF ROBOTIC SURGERY APPLICATIONS

Yavuz BAŞTUĞ, Osman YAZICIOĞLU, Oğuz BORAT



Araştırma Makalesi / Research Article

**BLOKZİNCİRİ TABANLI AKILLI HAVA MÜHİMMATI LOJİSTİK
TAKİP SİSTEMİ**

**BLOCKCHAIN-BASED INTELLIGENT AIR AMMUNITION LOGISTICS TRACKING
SYSTEM**

Enis KONACAKLI¹

Can EYÜPOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1085938>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
enisk@hvkk.tsk.tr

Geliş Tarihi / Received
10.03.2022

Kabul Tarihi / Accepted
29.08.2022

Öz

Blokzinciri, elli milyon dolarlık iş hacminin verdiği güçle, içinde bulunduğumuz on yılda geleceğin teknolojisi olduğunu kanıtlamıştır. İlk olarak kripto paralarla ünlenen bu teknoloji, mimari üstünlüğü sayesinde finans sektöründen lojistik yönetimine kadar pek çok alanda kullanım imkânı bulmuştur. Blokzinciri teknolojisinin kuvvetli, güvenli, denetlenebilir ve daha sonra kanıtlanabilir kayıtlara büyük ihtiyaç duyulan Hava Kuvvetleri akıllı silah sistemlerinin lojistik yönetiminde kullanılması mümkündür. Bu çalışmada blokzinciri teknolojisi kullanılarak silah sistemlerinin lojistik kayıtlarının oluşturulabileceği ve takip edilebileceği bir model tasarlanmıştır. Modele uygun olarak akıllı bir blokzinciri anlaşması yazılmıştır. Blokzincirinde gerçekleştirilebilecek bir gönderme HyperLedger Fabric çerçevesi kullanılarak örneklenmiştir. Sonuç olarak bu modelin diğer askeri lojistik takip uygulamalarında kullanılabilirliği ile ilgili bir değerlendirme yapılmıştır. Ayrıca ileride yapılabilecek çalışmalarda konunun nasıl geliştirilebileceği ile ilgili bazı çıkarımlarda bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Blokzinciri, akıllı mühimmatlar, hava kuvvetleri, lojistik yönetim sistemi.

Abstract

Blockchain has proven to be the technology of the future in the current decade, powered by a business volume of fifty million dollars. This technology, which was first famous for cryptocurrencies, has been used in many areas from the financial sector to logistics management thanks to its architectural superiority. It is possible to use blockchain technology in the logistics management of Air Force intelligent weapon systems where strong, secure, auditable and later demonstrable records are needed. In this study, a model is designed in which logistic records of weapon systems can be created and tracked using blockchain technology. A smart agreement is written in accordance with the model. A blockchain transaction that can be performed on the blockchain is sampled using the HyperLedger Fabric framework. As a result, an evaluation has been made regarding the usability of this model in other military logistics tracking applications. Besides, some inferences have been made about how the subject can be improved in future studies.

Keywords: Air force, blockchain, intelligent ammunition, logistics management system.

¹Milli Savunma Üniversitesi, Hezâfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye. enisk@hvkk.tsk.tr, Orcid.org/0000-0003-0645-0806.

²Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. ceyupoglu@hho.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6133-8617.

1 GİRİŞ

Blokzinciri, son on yıl içerisinde en çok araştırılan teknolojilerden biri haline gelmiştir. Asıl ününü kripto paralarla kazandığı pazar payıyla elde etmiştir. Nakamoto'nun ortaya koyduğu teoremin ilk uygulaması olan Bitcoin (Nakamoto, 2008), günümüzün en değerli para birimi olarak bu teknolojiyi herkes tarafından kullanılabilir hale getirmektedir. Blokzinciri veriyi saklamak için sunucu temelli merkezi yaklaşımların yerine dağıtık kayıt defteri mimarisini kullanmaktadır. Dağıtık kayıt defteri teknolojisi sadece blokzinciri mimarisine özel bir yapı değildir. Bu yapı hashgraph, holochain, tangle ve tempo gibi teknolojilerde de aktif kullanım alanı bulmaktadır (Karaarslan & Konacaklı, 2020).

Blokzincirini bu örneklerden üstün kılan en temel özellik, sahip olduğu kayıt defterinin döngüsel olarak kriptolanarak birbirine bağlanan veri bloklarından oluşmasıdır. Her blok kendinden bir önceki bloğun özet değerini kullanarak kapatılır. Blokların ardışık olarak dizilmesi ile elde edilen kriptografik zincir yapısı, silinmesi ve değiştirilmesi matematiksel olarak çok zor bir kayıt defteri oluşturur.

Lojistik yönetim, kayıt, depolama ve nakliye süreçlerinde kullanılan sistemlerde blokzinciri kullanımını ele alan pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu teknoloji, veri bloklarının bütünlüğünü ve artırılarak teşkil edilmiş kayıt defteri kayıtlarını silinmez, denetlenebilir ve daha sonra kanıtlanabilir bir şekilde koruyabilmektedir. Bu durum, özellikle daha sonra hukuki süreçlere konu olabilecek hassas bilginin depolanmasını gerektiren uygulama alanlarında blokzincirinin tercih edilmesini sağlamaktadır. Blokzinciri tabanlı lojistik takip sistemleri, bu teknolojinin dijital para olarak kullanımı dışında hayata geçirilmiş en başarılı uygulamalarıdır.

Hava Kuvvetleri tarafından kullanılmakta olan akıllı hava mühimmatları, hassas lojistik nakil ve depolama yönetimine ihtiyaç duyan sistemlerdir. ARGE ve üretim maliyetleri çok yüksektir. Çevresel faktörlerden çok kolay etkilenebilirler. Taşınması sırasında yaşanabilecek bir sarsıntı çok hassas olan bu sistemleri gayri faal duruma düşürebilir. Uygun ısı ve nem standardında depolanmayan mühimmatın, üzerindeki bir elektronik komponentin arızalanması onu kullanılamaz hale getirebilir.

Bu silahların depolanma ve nakil işlemlerinin ne zaman ve hangi şartlarda gerçekleştirildiği daha sonra hukuki olarak değerlendirmeye tabi tutulmak üzere çeşitli soruşturmalara konu edilebilir. Detaylı ve silinmez kayıtların yüksek öneme sahip olabileceği akıllı silah sistemleri depolama ve lojistik sistem kayıtlarında blokzinciri teknolojisinin kullanımının yenilikçi bir yaklaşım olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışmanın ana amacı, akıllı hava mühimmatlarının ve silah sistemlerinin lojistik kayıtlarının oluşturulabileceği ve takip edilebileceği blokzinciri tabanlı bir sistem tasarlamaktır. Çalışmanın bir sonraki bölümünde blokzinciri teknolojisi anlatılmış, bu teknolojinin kullanımında karşılaşılan problemler ve çözüm önerileri ele alınmıştır. Üçüncü bölümde blokzincirinin lojistik takip uygulamalarındaki kullanım alanları hakkında gerçekleştirilen diğer çalışmalarla ilgili bir literatür taraması yapılmıştır. Dördüncü bölümde çalışmada önerilen model anlatılmıştır. Beşinci bölümde gerçekleştirilebilecek bir kayıt örneği HyperLedger Fabric ara yüzü kullanılarak örneklenmiştir. Sonuç bölümünde önerilen modelin uygulanabilirliği ve diğer askeri malzemelerinin de lojistik takip sistemlerinde kullanılabilirliği ile ilgili bir değerlendirme yapılmış ve ileride yapılabilecek çalışmalarda konunun nasıl geliştirilebileceği ile ilgili çıkarımlarda bulunulmuştur.

2. BLOKZİNCİRİ

2.1. Blokzincirinin Çalışma Prensipleri

Blokzinciri, kripto paraların mimarilerinde kullanılan ve kayıtların (yarı) merkezi olmayan bir şekilde tutulmasını sağlayan teknolojidir. Otonom bir sistem olan blokzinciri, Nakamoto tarafından öne sürülmüş ve ilk uygulaması olan Bitcoin ile hayata geçirilmiştir. Blokların içerisine yazılan kodlarla sistemin sadece kripto para amaçlı kullanımına son verilmiştir. Akıllı anlaşma adı verilen bu yenilik ile çok farklı disiplinlerde uygulama alanı bulmaya başlamıştır (Dorri ve ark., 2019). Kayıtlar blokzincirine bloklar halinde yazılırlar ve bu bloklar, kriptografik teknikler kullanılarak ardışık şekilde birbirine bağlanır. Böylece birbirini devamlı olarak takip eden ardışık bir zincir yapısı oluşturulur.

Tüm işlem hareketlerine ait gönderme kayıtlarının tutulduğu yapıya kayıt defteri adı verilmektedir. Blokzincirinde kayıt defteri, peer-to-peer (P2P) yapıda eşler arasında eşzamanlı olarak tutulur. Bir eşin tuttuğu defterin aynısı diğer eşte de mevcuttur. Bu yapıya dağıtık defter teknolojisi (distributed ledger technology-DLT) adı verilir. Kayıt defteri, hiyerarşik olarak eşler ve düğümler arasında tutulur. Düğümler ve eşler aynı anda hem sunucu hem de istemci olarak davranabilir. Bu şekilde merkezi denetim olmayan bir mimari oluşturulur. Farklı donanıma sahip düğümler, Tablo 1’de özetlenen farklı işlevlere sahip olabilir.

Tablo 1. Blokzincir Düğüm Tipleri

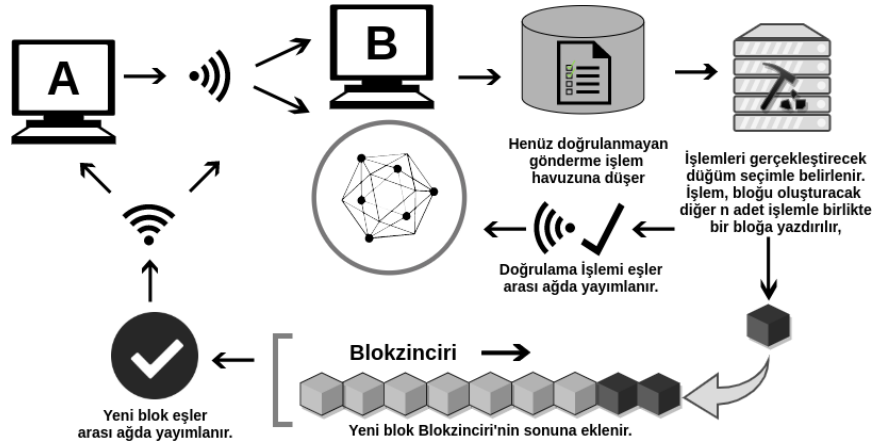
Düğüm Tipi	Örnek	İşlevi
Tam Düğüm	Büyük sunucu ve madenciler	Blokzincirinin tam kopyasını oluşturur, Blokları oluşturur, Blokları ve kayıtları onaylar, Yeni kayıt oluşturur, Kayıtları yayımlar.
Yarım Düğüm	Bilgisayar terminalleri	Blokzincirinin sadece başlık olarak kopyasını oluşturur, Yeni blokları, kayıtları onaylar, Eski kayıtları eş desteği alarak onaylar, Yeni kayıt oluşturur, Kayıtları yayımlar.
Basit Düğüm	Mobil cihazlar, cep telefonları	Yeni kayıtları onaylar, oluşturur, yayımlar.

Blokzincirinde eşler ve düğümlerin hiyerarşisi, bu düğümlerin sahip olduğu donanım kapasitelerine göre depolama alanlarını dolayısı ile defterin ne kadarının bu eşte tutulacağını da belirler. Bu eşlere ek yük gelmesini engellerken aynı zamanda maliyetlerinde eşit olarak dağıtılmasını sağlar. Fakat tutulmakta olan en düşük defter uzunluğu dahi eşin güvenliğini sağlamak için yeterli boyuttadır.

Blokzincirinde düğümler, yeni bloğu kimin yazacağına ilişkin seçim yapılması gibi işlemleri önceden belirlenmiş kurallar ve protokoller çerçevesinde gerçekleştirir (Kaya ve ark., 2020). Bu protokollere, konsensüs (uzlaşma) protokolleri adı verilir. En çok kullanılan konsensüs protokolleri Emegin İspatı (Proof of Work), Bizans Hata Toleransı (Byzantine Fault Tolerance) ve Sahipliğin İspatı (Proof of Stake) protokolleridir. Emegin ispatı (PoW) konsensüs protokolünde bir düğümün sisteme blok ekleyebilmesi zorluk derecesi belirlenmiş bir matematiksel problemi en hızlı biçimde çözerek başarısını diğer eşlere kanıtlaması gerekir. Bu işlem sonucunda başarılı düğüme verilen blok ödülü (block reward) sayesinde, işlem maliyetlerini karşılamak için gerekli kripto varlık veya dijital paranın da oluşması sağlanır. Sahipliğin ispatı (PoS) konsensüs protokolünde blok kapatma yetkisi verilecek eşin ilgili blokzincir ağında sahip olduğu pay

oranında söz sahibi olması sağlanır. Bizans hata toleransı (BFT) yaklaşımında Blokzincir sisteminde yer alan her cihaz, gerçekleştirilen her yeni veri girişini, verinin doğruluğunu kontrol eder onaylar. Daha sonra onaylanan işlemler imzalanarak ağ üzerinde paylaşılır. Çoğunluğun imzasını alarak onaylanan işlemler geçerlilik kazanarak blok içerisine işlenir hake gelebilir.

Emek ispatı (proof of work-PoW) protokolünü kullanan bir blokzinciri yapısında blokzincirinin çalışma prensibi Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu örnekte A kişisi B’ye bir gönderme yapmaktadır. Bu gönderme önce B kişisine ve tüm ağa yayımlanır. Yapılan tüm göndermeler P2P ağda öncelikle bir blok oluşturacak şekilde sıraya alınır. Blok tamamlanacak kadar gönderme sıraya alındığında konsensüs (uzlaşma) protokolü ile seçilen düğüm kriptografik özet fonksiyonu ile bloğu kapatır. Ardışık olarak sıralanan bloklar hesaplanan kriptografik özet fonksiyonları yardımı ile birbirine bağlanır.



Şekil 1. Blokzinciri Akış Diyagramı

2.2. Blokzincirinin Sağladığı Güvenlik Kolaylıkları

Sistemlerin güvenlik ihtiyaçları gizlilik (confidentiality), bütünlük (integrity) ve erişilebilirlik (availability) odağında ele alındığında blokzinciri;

- Blokları kapatırken kullandığı kriptolama fonksiyonu ile gizliliği,
- Yazılı veriyi bloklar arasında özet fonksiyonları ile kapatması sebebi ile bütünlüğü,
- Bir veya birden çok eş ağa dâhil olmasa bile diğer eşler üzerinden deftere erişimin sağlanabilmesi sebebi ile erişilebilirliği,
- Kullanılan açık anahtarlar yapısı ile kimlik denetimini,
- Sertifika yönetimi ve kayıt defterinin dağıtık yapısı ile kullanıcı ve bilginin doğruluğunun teyidini,
- Kayıt defterinin değiştirilemez yapısı ile sonradan kanıtlanabilirlik ve inkâr edilemezliği sağlamaktadır.

Blokzincirinin sağladığı güvenlik kolaylıkları milyonlarca kullanıcı tarafından yıllardır kripto para uygulamaları ile denenmekte ve başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Blokzinciri akıllı sözleşmelerle beraber yepyeni bir süreç içerisine girmiştir. Yepyeni kullanım alanlarına kavuşan blokzincir teknolojisinde kullanıcı sayılarının artması ile güvenlik, hız ve mahremiyet ile ilgili problem sahaları oluşmaya başlamıştır. Bu problemlere çözüm olarak farklı konsorsiyum protokolleri ortaya atılmış ve çözüm önerileri üzerine çeşitli akademik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar projelendirilerek çeşitli projeler ile hayata geçirilmiş ve blokzincirinin endüstriyel faaliyetlerde kullanımı bu sayede büyük bir atılım gerçekleştirmiştir. Yıllara sâri olarak genişleyen kullanım alanlarına ve uygulamalarda oluşan çeşitliliğe rağmen

blokzinciri tasarımı ile ortaya koyduğu güvenlik kolaylıklarını halen başarılı bir şekilde kullanıcılara sağlayabilmektedir.

3. KONU ÜZERİNE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Blokzincirinin depolama ve lojistik alanlarında kullanımına yönelik pek çok akademik çalışma ve uygulama mevcuttur.

3.1. Literatürdeki Çalışmaların Kapsamı

Literatürde var olan çalışmalar son zamanlarda yayımlanmış (2020) ve en az bir kez farklı bir kaynaktan referans gösterilmiş olma şartı ile seçilerek bu makalede kullanılmıştır. Bu bölümde yapılan incelemede ele alınan on altı çalışma özetlenmektedir. Blokzincirinin Lojistik yönetim amacı ile kullanımı konusunu ele alan tarama makaleleri Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Lojistik Yönetiminde Kullanımı İle İlgili Tarama Çalışmaları

Jain ve ark.	2020	Blokzinciri teknolojisinin lojistik endüstrisinde kullanımının (TAM ve SEM) müşteriler tarafından ne ölçüde anlaşıldığı ve kabul edildiği araştırılmıştır.
Koh ve ark.	2020	Nakliye ve lojistikte blokzincirin kullanımına ilişkin en son uygulama ve çalışmaları özetlenmiş ve gelecekteki kullanım alanlarına yönelik çıkarımlarda bulunulmuştur.
Issaoui ve ark.	2020	Akıllı lojistikte blokzincirin çeşitli uygulamaları tanımlanmış ve yapılmakta olan uygulamalar bilgi, ulaşım, finans ve yönetim olmak üzere dört sınıfa ayrılmıştır.
Batta ve ark.	2020	Blokzinciri teknolojisinin lojistik ve taşımacılık yönetim süreçlerine uygulanmasına yönelik yapılan çalışmalarla ilgili bir simetrik akademik çalışma incelemesi yapılmıştır ve gelecek uygulama alanlarına yönelik tavsiyelerde bulunulmuştur.
Orji ve ark.	2020	Blokzinciri teknolojisinin lojistikteki kullanım alanları teknoloji-organizasyon-çevre değişkenleri çerçevesinde analitik ağ süreci yöntemi kullanılarak önceliklendirilmiştir.
Pournader ve ark.	2020	Teknoloji, güven, ticaret ve izlenebilirlik/şeffaflık ana kümeleri üzerinde tedarik zinciri, lojistik ve nakliye yönetimi üzerine yayımlanmış blokzinciri konusundaki akademik çalışmalar incelenmiş ve bu konularda çıkarımlarda bulunulmuştur.
Müßigmann ve ark.	2020	Gelecekteki araştırmalara bir temel oluşturmak üzere blokzinciri teknolojisinin lojistik ve tedarik zinciri süreçlerine uygulanması konusundaki 613 akademik çalışmadan alınan verileri içeren bir bibliyometrik analiz sunulmuştur.
Tönnissen & Teuteberg	2020	Blokzinciri teknolojisinin tedarik zinciri ve lojistik yönetimi süreçlerindeki uygulama alanları incelenmiş, bu teknolojinin lojistik endüstrisi ve iş modellerine etkisine ilişkin çıkarımlarda bulunulmuştur.

Jain ve ark. (2020), blokzinciri teknolojisinin lojistikte kullanımı müşteri kabul oranını araştırmıştır. Algılanan kullanılabilirlik ve kullanım kolaylığı değişkenlerini ile bir müşteri teknoloji kabul modeli belirlemişlerdir. Blokzincirinin lojistik alanında kullanılabilir ve gelecek vadeden bir teknoloji olduğu vurgulanmıştır.

Koh ve ark. (2020), Johnson ve ark. (2020), Batta ve ark. (2020), Issaoui ve ark. (2020) ile Tönnissen ve Teuteberg (2020) çalışmalarında lojistikte blokzincirin kullanımı ile ilgili çalışmaları özetlemiş ve blokzincirinin gelecekte kullanım alanlarına yönelik çıkarımlarda bulunmuşlardır.

Orji ve ark. (2020) çalışmalarında Blokzincirinin lojistikte yönetiminde kullanım alanlarını analitik ağ süreci yöntemi kullanılarak önceliklendirmişlerdir.

Pournader ve ark. (2020) belirtilen diğer çalışmalar ile birlikte blokzinciri teknolojisinin lojistik yönetim süreçlerinde kullanım alanlarını tarama makalesi formatında ele almışlardır. Literatür taraması esnasında daha eski yıllarda yayımlanan tarama makaleleri sayıları kapsamları kısıtlı kalırken yeni tarihli çalışmalarda araştırmacıların bu teknolojinin farklı kullanım alanları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir.

Müßigmann ve ark. (2020) blokzinciri teknolojisinin lojistik ve tedarik zinciri yönetim süreçlerindeki uygulama alanlarına yönelik oldukça genişletilmiş bir tarama makalesi kaleme almışlardır.

Mezquita ve ark. (2020) çalışmalarında, dağıtıcı ve müşteriler arasındaki aracı kurumların ortadan kaldıracak blokzinciri tabanlı lojistik yönetim sistemi önermişlerdir. Modelde, güvenliği artırılarak süreçlerin otomatikleştirilmesi sağlanmıştır.

Tan ve ark. (2020), blokzinciri tabanlı bir lojistik (green logistic) yönetim sistemi tasarlamışlardır. Nesnelerin interneti (Internet of things-IoT) cihazları fiziksel katmanda tasarlanan modele sensör olarak entegre edilmiştir. Modelin gerçekleştirildiği takdirde sağlayabileceği faydalar üzerinde durulmuştur.

Kifokeris ve Koch (2020), yapmış olduğu çalışmada malzeme ve para akışı ve verinin birbirine entegre edildiği blokzinciri tabanlı bir sistem önermişlerdir. Blokzinciri teknolojisi ile IoT'nin entegrasyonunun sağlayabileceği faydalar üzerinde durmuşlardır.

Irannezhad (2020), limanlarda kullanılan lojistik iş yönetim süreçleri (port community system-PCS) için blokzinciri tabanlı bir model önermiştir.

Humayun ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada IoT ve blokzinciri entegrasyonu ile şeffaf, güvenli, sonradan kanıtlanabilir ve inkâr edilemezliğin sağlandığı bir model tasarlanmıştır ve iki kullanım alanında da bu konu örneklenmiştir. Çalışmada SmaTaxi ve Dammam ve Rotterdam limanları arasındaki lojistik takip sistemi örnek olarak gösterilmiştir.

Ar ve ark. (2020), çalışmasında blokzincirinin lojistikteki kullanımını ile ilgili olarak Türkiye'de faaliyet gösteren büyük ölçekli lojistik firmaları üzerinde bir fizibilite çalışması yapmışlar ve konu ile ilgili çıkarımlarda bulunmuşlardır.

Hribernik ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada e-ticaretteki büyüme ile kurye, taşıma ve paket (courrier-express-packet-CEP) alanındaki problemlere çözüm getirmek üzere blokzinciri tabanlı bir model önermişlerdir.

Blokzinciri teknolojisinin lojistik yönetim sistemlerinde kullanımını ele alan çalışmalar ile bu çalışmalarda ele alınan teknolojiler Tablo 3'te özetlenmiştir.

Tablo 3. Lojistik Yönetiminde Kullanımı İle İlgili Diğer Çalışmalar

Yazar	Yılı	Çalışmanın Kapsamı	Kullanılan Teknoloji
Tian ve ark.	2020	Kentsel lojistik zincirindeki müşteri, hizmet sağlayıcıları ve üçüncü otoriteler arasındaki şeffaflık problemini çözmek üzere bir model tasarlanmıştır.	BC, IoT ve ML (Modelleme)
Humayun ve ark.	2020	IoT ve blokzinciri entegrasyonu ile akıllı ulaşım ve lojistikte kullanılabilecek; şeffaflık, güvenlik sonradan kanıtlanabilirlik ve inkâr edilemezliğin sağlandığı bir model tasarlanmıştır.	IoT ve BC (Modelleme)
Tan ve ark.	2020	Fiziksel katmanda sensör olarak IoT cihazların kullanıldığı blokzinciri tabanlı bir yeşil lojistik takip sistemi modellenmiştir.	IoT ve BC (Modelleme)
Kifokeris ve Koch	2020	Materyal, ekonomik akış ve verinin birbirine entegre edildiği blokzinciri tabanlı bir sistem önerilmiştir. Bu model swimlane süreç akış diyagramında okuyucuya görsel olarak sunulmuştur.	IoT ve BC (Modelleme)
Hribernik ve ark.	2020	E-ticaretteki büyüme ile CEP sektöründeki sorunlara çözüm getirmek için blokzinciri tabanlı bir model sunulmuştur.	IoT ve BC (Modelleme)
Ar ve ark.	2020	AHP'yi sezgisel bulanık teori altında VIKOR'a dahil eden çok kriterli bir karar destek modeli kullanılmıştır.	BC, VIKOR Bulanık mantık (Modelleme)
Mezquita ve ark.	2020	Distribütör ve müşteriler arasındaki çok sayıda aracı kurum ile üçüncü tarafın da dahil olduğu lojistik hizmetlerinin daha yönetilebilir hale getirilmesini sağlamak üzere blokzinciri tabanlı bir sistem önerilmiştir.	BC (Modelleme)
Irannezhad	2020	Limanlarda kullanılan lojistik iş yönetim süreçlerinde işlem maliyetini düşürmek için blokzinciri tabanlı bir çözüm sunulmuştur.	IoT ve BC (Modelleme)

Tablo 4'te ana ürün olarak blokzincir teknolojisini kullanan en büyük ekonomiye sahip 48 şirket listelenmiştir. Blokzincir teknolojisinin kullanım alanları dikkate alındığında yoğunluklu olarak değer transferi ve bankacılık sektörünün öne çıktığı görülmektedir.

Tablo 3 ile veilen çalışmalar değerlendirildiğinde, bu çalışmaların blokzinciri teknolojisini askeri uygulamalarına değinmediği görülmektedir. Genel literatür taramasına bakıldığında bu teknolojinin askeri bilgi sistemleri üzerine uygulamaları üzerine çok fazla yayına yer verilmediği anlaşılmaktadır. Tablo 4 ile listelenen blokzincir çözümü üreten endüstriyel ve özel kuruluşlarında askeri uygulamalara henüz yönelmemiş olduğu tespit edilmektedir.

Konu bu kapsamda ele alındığında sunmakta olduğumuz model, blokzincir teknolojisinin doğrudan askeri elektronik ve bilgi sistemlerinde uygulanabilirliğine yönelik bir örnek teşkil etmektedir. Literatür taraması ile özetlenen çalışmalara paralel olarak askeri bir uygulama için modellenen lojistik takip sisteminde IoT, blokzincir teknolojisinin kullanılması planlanmıştır.

Verilen model ile askeri lojistik sistemlerde blokzincirinin tutulan kayıtlarda sağladığı güvenliğin yanında, inkar edilemezlik özelliği ile kritik malzemenin takibinde daha sonra yapılabilecek tahkikat ve soruşturmalara delil niteliğinde sağlam veri sağlayabilmesi hedeflenmektedir.

Tablo incelendiğinde özellikle lojistik yönetimi ve gıda zinciri gibi, depolama ve nakliye kayıtlarında araçları ortadan kaldırıldığı çözümlerin de tabloda kendilerine yer bulduğu anlaşılmaktadır. Yapılmakta olan çalışma ve faaliyet alanları dikkate alındığında lojistik alanda blokzinciri kullanımının hayata başarılı bir şekilde geçirilebileceği görülmektedir.

Tablo 4. Endüstriyel Blokzincir Çözümleri

Japan Exchange Group Blockchain Consortium	Walmart Blockchain for Food Safety	Ubitquity Blockchain in Real Estate
HYPR and Blockchain Biometrics	Whaleclub Trading Supported by Blockchain	EasyBit Expands Bitcoin ATM Network to Vietnam
Blockchain Technology as Medium to Declare Love and Marriage	Bitcoin Boosts Solar Energy Industry	LO3 Energy and Siemens Blockchain for Microgrids
MasterCard Blockchain APIs	ConsenSys and UAE Partnership for Blockchain Projects	People's Bank of China Digital Currency
China Halts withdrawals of Bitcoin	Huiyin Group Bitcoin Fund	BitFury Group and Blockchain
Reserve Bank of India Blockchain Technology for Trade Applications	YES Bank to Multi-nodal Blockchain Solution for Bajaj Electricals	European Bank Digital Trade Chain
BTL Group to Test Interbit Platform with Energy Companies	BNP Paribas Test Blockchain-Based Real-Time Corporate Payments	WISeKey to Establish IoT Blockchain Center of Excellence
ARK Crew Testnet for Blockchain	ICICI Bank and NBD Blockchain-based Transactions	PAXOS Blockchain for Gold Settlement with Euroclear
Microsoft and BAML Blockchain Improve Trade Finance	Mahindra Group Blockchain Solution with IBM	Chitkara University Blockchain for E-Documents
UBS Expands Blockchain in China	IBM China and UnionPay Permissioned Blockchain Network	IBM and Beijing Energy-Blockchain Labs Use Blockchain for Carbon Trading
European Central Bank and Japan Central Bank Explore Blockchain	OneCoin Enhanced Blockchain	Sompo Japan Use Blockchain for Catastrophe and Weather Derivatives
Singapore Blockchain for Electronic Payment System	Accenture and Digital Asset Holdings Blockchain Practice	RISE Financial Technologies Post-Trade Blockchain Technology
VISA to Introduce Blockchain-Based Solution for Payment Services	Chain Inc. Released Open Source Blockchain Protocol	Colu and Blockchain-Based Currencies
DigitalX Partnership with Telefonica	Eris Industries Partners with Ledger Improve Blockchain Hardware Security	Monax Industries Partnership with Ledger for Blockchain Hardware Security
Electron Ethereum Blockchain in UK Energy Sector	Bank of Russia Tests Masterchain	GoCoin Merges with Ziftr
Tunisia National Payment Platform	Digital Asset Acquired Elevence	NASDAQ Blockchain in Private Market with Chain Inc.

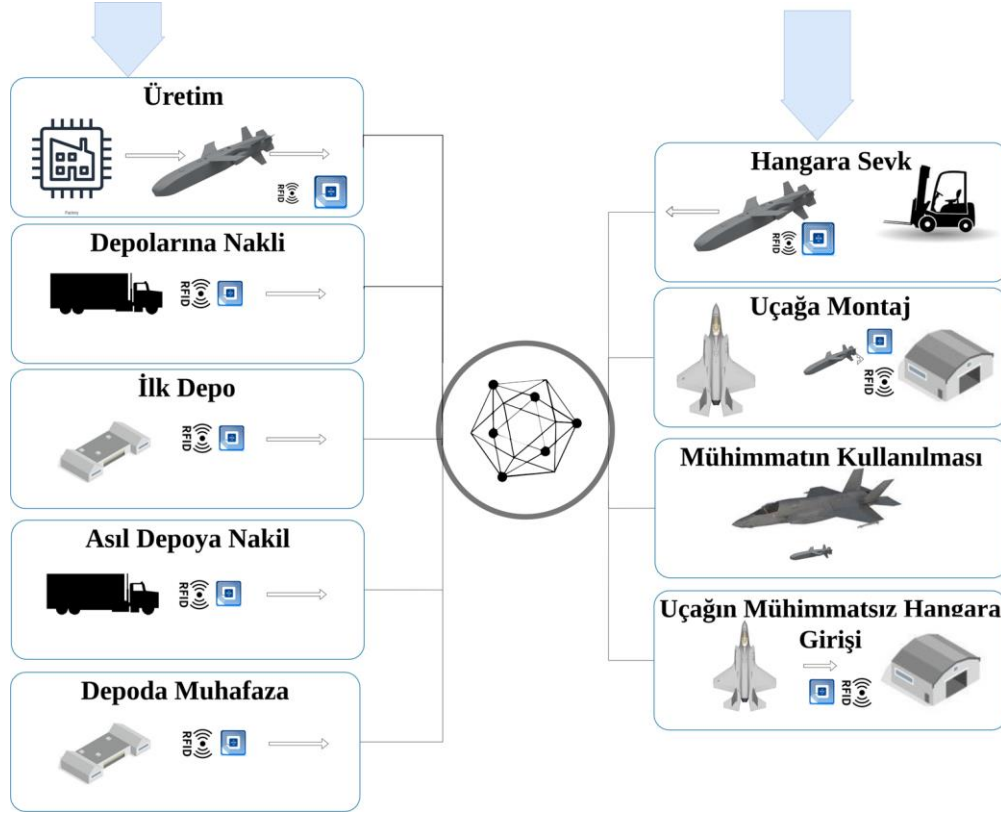
Yapılan çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde blokzinciri teknolojisinin lojistik, malzeme nakli, depolama ve stok yönetimi konularında kullanımının giderek yaygınlaştığı tespit edilse de bu alanda değerlendirilmesi gereken ciddi bir çalışma alanı bulunduğu görülmektedir. Yapılan tüm çalışmalarda araştırmacılar için bir fırsat olarak değerlendirilmiş yeni bir çalışma alanı olarak tanımlanmıştır.

4. ÖNERİLEN MODEL

Hava Kuvvetleri tarafından harekât sahasında kullanılmakta olan akıllı silah sistemleri düşman hava savunma sistemlerinin etkili menziline girmeden hedeflerin büyük bir doğrulukla vurulmasını sağlayan ve durağan satih hedeflerine ve hareketli su üstü hedeflere karşı etkin bir şekilde taarruz kabiliyeti bulunan uzun menzilli taktik silahlardır.

Günümüzde bu silahlar milli imkânlar dâhilinde ARGE çalışmaları yapılarak geliştirilmekte ve test edilerek kullanıma verilmektedir. Bu silahların hava harekâtında etkili kullanımını operasyonun başarısını doğrudan etkileyebilecek öneme sahiptir. Ayrıca silahların gerektiği anda etkili olarak kullanımını sağlayabilmek için uygun depolanma nakliye ve montaj şartlarının mutlaka sağlanması gereklidir.

Bu çalışmada önerilen blokzinciri tabanlı akıllı hava mühimmatı lojistik takip sistemi Şekil 2’de sunulmaktadır.



Şekil 2. Önerilen Model

Tasarlanan model fiziksel, akıllı anlaşma, veri ve sayısal olmak üzere toplam üç katmandan oluşan bir yapı içerisinde teşkil edilmiştir. Fiziksel katman taşıma kutusu üzerine montajlı radyo frekansı ile tanımlama (radio-frequency identification-RFID) teknolojisi ile ısı ve nem sensörü ve bu sensörlerin veri çıkışını sağlayan ağ bağlantı cihazı ile sağlanmaktadır. Akıllı anlaşma, kullanılan konsensüs modelini ve modeldeki değişkenlerin tiplerine göre görevlerini tanımlar. Veri ise blokzinciri içerisinde bloklara yazılarak tutulacak olan veridir. Kullanılan silahların taşınması ve depolanması büyük dikkat gerektirmektedir. Ayrıca gerekli depolama şartlarının sağlanabilmesi için silahlar, montajları yapılanaya kadar özel olarak tasarlanmış kutularda muhafaza edilmelidir. Bu sebeple model kapsamında fiziksel katmanı oluşturan cihazların taşıma kutularına monte edilmesi planlanmıştır. Tasarlanan modelde mühimmat kutularına RFID ve diğer cihazlar IoT olarak tanımlanmış ve mühimmat kutularının kablosuz bağlantı ile saklama koşulu bilgilerini düzenli olarak merkezi sistemle paylaştığı kabul edilmiştir.

5. ÖNERİLEN MODELİN GERÇEKLENMESİ

5.1. Hyperledger’da Modelin Gerçeklenmesi

Modelde belirtilen akıllı anlaşma katmanı bir uygulama ile HyperLedger Fabric arayüzü üzerinde test edilmiştir. Bu kapsamda Hyperledger Fabric, Hyperledger Composer Playground ve diğer programlama gereksinimleri, 8 GB RAM, 500 GB sabit disk ve Intel i5 2.6 GHz işlemciye sahip, üzerinde Ubuntu 18.04 işletim sistemi kurulu bir bilgisayar üzerine tesis edilmiştir. Yazılan akıllı anlaşma ve script dosyaları Hyperledger Composer Playground üzerinde denenmiştir. Uygulama geliştirilirken Hyperledger Fabric, Virtualbox sanallaştırma ortamında kurulu Ubuntu Trusty 64 ve Docker Container sanal makineleri üzerinde çalıştırılmıştır. Sanal makineler Vagrant kullanılarak yönetilmiştir. Veritabanı olarak CouchDB sanal makineleri kullanılmıştır. İşlem günlükleri ve varlıkların güncel durumunu korumak üzere her eş için ayrı veritabanı tanımlanmıştır. Hyperledger Fabric’te tanımlanan IoT terminal ve gate terminal kullanıcıları için bir kanal, operator kullanıcısı için ayrı bir kanal ve her kanal için ayrı bir sertifika yetkilisi tespit edilmiştir. Sertifikaların teyidi ve kullanıcı kimlik doğrulaması Üyelik Hizmet Sağlayıcısı (MSP) tarafından sağlanmıştır. Akıllı sözleşme kural tablosu ile IoT terminal ve gate terminal kullanıcılarına yazmak ve okumak için izin verilirken, operator kullanıcılarına sadece okuma izni tanımlanmıştır. Dağıtımda kolaylık sağlaması için SOLO konsensüs protokolü tercih edilmiştir. Değişken tanımlamaları için modeldeki hangar vb. ortam geçişleri “gate” değişkeni, cihazın nem ve ısı bilgisini paylaşan IoT bağlantısı “IoT” değişkeni ile tanımlanmıştır. Değişken tanımlamaları Şekil 3’te gösterilmektedir.

```

asset IoTtrack identified by IoTtrackId{
  o String    IoTtrackId
  o tapa     tapa optional
  o Long     trackNumber
  o DateTime  trckTime optional
  o String   zimmet optional
  o Isnem    isnem
}

asset Gatetrack identified by GatetrackId{
  o String    GatetrackId
  o tapa     tapa optional
  o Long     trackNumber
  o DateTime  trckTime optional
  o String   zimmet optional
  o Isnem    isnem
}

```

Şekil 3. Değişken Tanımlamaları

Abstract participant olarak AIRLOJparticipant tanımlanmış, abstract participant’tan IoTterminal, Gateterminal, Operator (kayıtarı görme yetkisi verilmiş sistem malzeme zimmet yöneticisi) ve NetworkAdmin participant üretilmiştir. Üretilen participant’lar Şekil 4’te gösterilmektedir.

```

abstract participant AIRLOJparticipant identified by participantId{
  o String participantId
}
participant IoTterminal extends AIRLOJparticipant {
}
participant Gateterminal extends AIRLOJparticipant {
}
participant Operator extends AIRLOJparticipant {
}
participant NetworkAdmin extends AIRLOJparticipant {
}

concept Isnem {
  o Long isi
  o Long nem
  o DateTime trckTime
}

transaction createiotTrack {
  o Long trackNumber
  o Long isi
  o Long nem
  o DateTime trckTime
}

transaction creategateTrack {
  o Long trackNumber
  o Long isi
  o Long nem
  o DateTime trckTime
}

```

Şekil 4. Katılımcıların Tanımlanması

Akıllı anlaşma içerisinde IoT ve Gate Operator participant'a okuma yetkisi tanımlanması ve Operator participant'a yazma yetkisi verilememesi Şekil 5'te gösterildiği gibidir.

```

rule IoTTERMINALCanReadEverything {
  description: "Allow IoT participants read access to all resources"
  participant: "org.turaf.airloj.weapon.IoTterminal"
  operation: READ
  resource: "*"
  action: ALLOW
}
rule GateTERMINALCanReadEverything {
  description: "Allow Gate participants read access to all resources"
  participant: "org.turaf.airloj.weapon.Gateterminal"
  operation: READ
  resource: "*"
  action: ALLOW
}
rule OperatorCanReadEverything {
  description: "Allow Operator participants read access to all resources"
  participant: "org.turaf.airloj.weapon.Operator"
  operation: READ
  resource: "*"
  action: ALLOW
}
/**
 * IoT vs. Gate vs. Operator access control submit.
 */
rule IoTTERMINALCanSubmitEveryTransaction {
  description: "Allow IoT participants to submit every transaction"
  participant: "org.turaf.airloj.weapon.IoTterminal"
  operation: CREATE
  resource: "*"
  action: ALLOW
}
rule GateTERMINALCanSubmitNationalTransactions {
  description: "Allow Gate participants to submit transactions"
  participant: "org.turaf.airloj.weapon.Gateterminal"
  operation: CREATE
  resource: "*"
  action: ALLOW
}

```

Şekil 5. Yetkilendirmelerin Tanımlanması

5.2. Modelin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada oluşturulan model sadece akıllı silah sistemlerinin lojistik takibi göz önünde bulundurularak örneklenmiştir. Tasarlanan model için üretilmesi gereken kayıt hazını saniyede 3500 gönderme işlemi yapabilen Hyperledger Fabric altyapısının rahatlıkla kaldırabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte ağ genişledikçe ortaya çıkacak problemler ile ilgili detaylı analiz yapılması gerekmektedir. Model daha geniş bir ağ için tasarlanacaksa sistem üzerinde tesis edilecek sensörlerin ve algılayıcı cihazların topolojik bağlantılarının da göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Dar kapsamlı bir ağda algılayıcılar daha statik kalacağından blokzincirinin gerektirdiği matematiksel işlemler, bu cihazların bağlı oldukları daha büyük bir makine tarafından gerçekleştirilebilir. Sisteme genişledikçe topolojiye yeni sistem ve algılayıcıların eklenmesi söz konusu olacaktır. Bu durumda mimari yapının kablosuz algılayıcı ağ fiziksel kapasite ve ihtiyaçlarını da göz önünde bulundurularak yeniden tasarlanmasına ihtiyaç duyulabileceği değerlendirilmektedir. Tasarlanan modele dâhil edilecek cihaz sayısı arttıkça birim zamanda üretilecek onaylama gönderme hızının da daha verimli olabilecek holochain, hashgraph gibi dağıtık kayıt defteri yapılarında gerçekleşmesi veya uygulamaya özel veri yapısı, konsensus ve ağ mimarisinin tasarlanması uygulanabilirliği arttıracaktır.

6. SONUÇ

Blokzinciri gelecek vadede bir teknoloji olarak popülerliğini korumaya devam etmektedir. Bu teknolojinin lojistik yönetimi konusunda başarılı bir şekilde kullanılabilmesi değerlendirilmektedir. Blokzinciri teknolojisinin askeri teknolojilerde kullanımı ile ilgili literatürde yeterli miktarda çalışma bulunmamaktadır. Bu teknolojinin özellikle askeri haberleşme güvenliği konularında kullanımı bu konu üzerinde çalışmak isteyenler için değerlendirilmesi gereken bir fırsat olarak görülmelidir. Bu çalışmada akıllı hava mühimmatlarının ve silah sistemlerinin lojistik kayıtlarının oluşturulabileceği ve takip edilebileceği blokzinciri tabanlı bir sistem önerilmiştir. Çalışma, sonraki versiyonunda genişletilmiş aptal kod eklenerek geliştirilecektir. Eğitim amaçlı kurulmuş geniş bir blokzinciri ağında modelin gerçekleştirilerek test edilmesi hedeflenmektedir. Farklı konsensiyum protokollerine sahip arayüzler kullanılarak bir performans değerlendirmesi gerçekleştirilecektir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Ar, I.M., Erol, I., Peker, I., Özdemir, A.I., Medeni, T.D. & Medeni, I.T., (2020). Evaluating the feasibility of blockchain in logistics operations: A decision framework. *Expert Systems with Applications*, 158, 113543.

- Batta, A., Gandhi, M., Kar, A.K., Loganayagam, N. & Ilavarasan, V., (2020). Diffusion of blockchain in logistics and transportation industry: An analysis through the synthesis of academic and trade literature. *Journal of Science and Technology Policy Management*, 12(3), 378-398.
- Dorri, A., Kanhere, S.S., Jurdak, R. & Gauravaram, P., (2019). LSB: A Lightweight Scalable Blockchain for IoT security and anonymity. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 134, 180-197.
- Hribernik, M., Zero, K., Kummer, S. & Herold, D.M., (2020). City logistics: Towards a blockchain decision framework for collaborative parcel deliveries in micro-hubs. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 8, 100274.
- Humayun, M., Jhanjhi, N.Z., Hamid, B. & Ahmed, G., (2020). Emerging smart logistics and transportation using IoT and blockchain. *IEEE Internet of Things Magazine*, 3(2), 58-62.
- Irannezhad, E., (2020). The Architectural Design Requirements of a Blockchain-Based Port Community System. *Logistics*, 4(4), 30.
- Issaoui, Y., Khiat, A., Bahnasse, A. & Ouajji, H., (2020). Smart Logistics: Blockchain trends and applications. *Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Network*, 12(2), 9-15.
- Jain, G., Singh, H., Chaturvedi, K.R. & Rakesh, S., (2020). Blockchain in logistics industry: in fizza customer trust or not. *Journal of Enterprise Information Management*, 33(3), 541-558.
- Johnson, A., McCurdy, D., Schechter, D. & Loch, K., (2020, Ocak, 7-10). *Hot or Cold... How Ready are Third Party Logistics Cold Storage Companies to Implement Blockchain?* 53rd Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, 5308-5317.
- Karaarslan, E. & Konacaklı, E., (2020). Data Storage in the Decentralized World: Blockchain and Derivatives. Gülseçen, S., Sharma, S.K. & Akadal, E. (Editör), *Who Runs the World: Data*, İstanbul University Press, İstanbul.
- Kaya, Ö.F., Benli, V.F. & Yetgin, F., (2020). Varlığa dayalı finansman işlemlerinde Blokzincir etkisinin analizi: Gayrimenkul sertifikaları ve Blokzincir entegrasyonu, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(37), 57-63.
- Kifokeris, D. & Koch, C., (2020). A conceptual digital business model for construction logistics consultants, featuring a sociomaterial blockchain solution for integrated economic, material and information flows. *Journal of Information Technology in Construction*, 25(29), 500-521.
- Koh, L., Dolgui, A. & Sarkis, J., (2020). Blockchain in transport and logistics—paradigms and transitions. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2054-2062.
- Konacaklı, E., (2019). *Ulusal güvenlik için blokzinciri tabanlı siber güvenlik modeli*. [Yüksek Lisans Tezi], Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 50.
- Mezquita, Y., Casado-Vara, R., González Briones, A., Prieto, J. & Corchado, J.M., (2020). Blockchain-based architecture for the control of logistics activities: Pharmaceutical utilities case study. *Logic Journal of the IGPL*, 29(6), 974-985.

- Müßigmann, B., Von der Gracht, H. & Hartmann, E., (2020). Blockchain technology in logistics and supply chain management—a bibliometric literature review from 2016 to january 2020. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 988-1007.
- Nakamoto, S., (2008). *Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System*. Whitepaper. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> adresinden 01 Mart 2022 tarihinde alınmıştır.
- Orji, I.J., Kusi-Sarpong, S., Huang, S. & Vazquez-Brust, D., (2020). Evaluating the factors that influence blockchain adoption in the freight logistics industry. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 141, 102025.
- Pournader, M., Shi, Y., Seuring, S. & Koh, S.L., (2020). Blockchain applications in supply chains, transport and logistics: a systematic review of the literature. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2063-2081.
- Tan, B.Q., Wang, F., Liu, J., Kang, K. & Costa, F., (2020). A blockchain-based framework for green logistics in supply chains. *Sustainability*, 12(11), 4656.
- Tian, Z., Zhong, R.Y., Vatankhah Barenji, A., Wang, Y.T., Li, Z. & Rong, Y., (2020). A blockchain-based evaluation approach for customer delivery satisfaction in sustainable urban logistics. *International Journal of Production Research*, 2229-2249.
- Tönnissen, S. & Teuteberg, F., (2020). Analysing the impact of blockchain-technology for operations and supply chain management: An explanatory model drawn from multiple case studies. *International Journal of Information Management*, 52, 101953.



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Istanbul Commerce University Journal of Science

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



Araştırma Makalesi / Research Article

BALKÜPLERİNİN SALDIRI VE SAVUNMA AÇISINDAN İNCELENMESİ EXAMINATION OF HONEYPOTS FROM OFFENSIVE AND DEFENSIVE PERSPECTIVE

Muhammed Sadık KARABAY¹ Can EYÜPOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1245975>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
ceyupoglu@hho.msu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
01.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted
13.04.2023

Öz

Geçtiğimiz son 20 yıldaki teknolojik gelişmelerle beraber bilgisayar ağlarının kapasitesi ve bağlanan cihaz sayısı sürekli artmaktadır. Özellikle nesnelerin interneti (Internet of Things-IoT) teknolojisi ile internete bağlı cihaz sayısının 50 milyarı aşması beklenmektedir. Son kullanıcı tarafından kullanılan akıllı cihazlar ve bu cihazların kullanımındaki artış beraberinde devasa boyutlardaki veri akışını da getirmiştir. Covid-19 süreci ile uzaktan çalışma, çevrimiçi eğitim vb. durumlar neredeyse tüm işlemleri internet üzerinden yürütmeye ve verilere internet üzerinden erişime olanak vermiştir. Tüm bunlarla beraber, verilerin saklandığı, yürütüldüğü ve işlendiği sistemler saldırganların hedefi haline gelmiştir. Bu çalışmada olası siber saldırı senaryolarında saldırganların kurumsal ağ sisteminin içine sızması durumunda saldırganların dikkatini başka yöne çekmesine olanak sağlayacak balküplü sistemleri, hem saldırgan hem de savunan bakış açısıyla ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balküplü, kızıl takım, siber saldırı, tuzak sistemler.

Abstract

With the technological developments in the last two decades, the capacity of computer networks and the number of connected devices are constantly increased. Especially with the Internet of Things (IoT) technology, the number of devices connected to the Internet is expected to exceed 50 billion. The smart devices used by the end users and the increase in the use of these devices have brought with them huge data flow. With the Covid-19 process, remote work, online education, etc. systems have made it possible to do almost all activities online and to access data over the internet. With all this, the systems in which data is stored, executed and processed have become the target of attackers. In this study, honeypot systems, which will allow attackers to divert the attention of attackers in case of infiltration into the corporate network system in possible cyber attack scenarios, are discussed from both the attacker and the defender perspective.

Keywords: Cyber attack, honeypot, red team, trap systems.

¹Kuveyt Türk Katılım Bankası, Ar-Ge Merkezi, Kocaeli, Türkiye.

Milli Savunma Üniversitesi, Hezârfen Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
karabay18@itu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-2524-439X.

²Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
ceyupoglu@hho.msu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6133-8617.

1. GİRİŞ

Kurumsal ağlarda güvenlik mekanizması genellikle dışarıdan gelebilecek saldırıları engelleme amaçlı tasarlanmaktadır. Ancak saldırgan bir şekilde sistem içerisine sızabilir. İşte bu noktada eğer ağda bir Saldırı Tespit Sistemi (Intrusion Detection System-IDS) yoksa saldırgan tespit edilemez ve dışarıya yönelik alınan tedbirler atlatılmış olur. Bu nedenle her noktada güvenlik prensibi ile hareket ederek, ağ içerisine bir IDS konumlandırılması gerekmektedir. Balküpu sistemleri saldırganı kendi üzerine çekerek ağ üzerinde bulunan değerli varlıkları korumayı ve saldırganı saldırı öncesi tespit etmeyi amaçlamaktadır. Balküpu sistemleri IDS'lere destek amaçlı kullanılmaktadır (Ng ve ark., 2018).

Literatürde balküpu sistemlerine ilişkin tasarımsal açıdan birçok çalışma bulunmaktadır. En kapsamlı çalışmalardan biri Bringer ve ark. (2012) tarafından gerçekleştirilmiş ve balküpleri birçok farklı açıdan değerlendirilmiştir. Bu çalışmada balküpu tasarım prensipleri, tespit uzmanlık alanları, limitleri ve fidye balküplerine değinilmiştir. İlgili çalışmada daha çok savunma amaçlı yaklaşımlara odaklanılmıştır. Zimmerman (2014) tarafından MITRE kuruluşunun desteği ile yayımlanan kitapta birinci sınıf siber güvenlik operasyon merkezleri için on stratejiden bahsedilmiştir. İlgili çalışmada siber operasyon tatbikatları ve bu tatbikatlarda ekiplerin rollerinden bahsedilmiş olup balküplerinin görevlerine değinilmiştir.

Giderek daha önemli hale gelen siber uzay güvenliği sorunlarıyla başa çıkmak için balküpu teknolojileri uygulanmaktadır. Bunun nedeni, mevcut siber çatışmalardaki tipik savunma stratejilerinin sıklıkla dezavantajlı duruma düşmesi sorunudur. Yang ve ark. (2023) bu sorunların üstesinden gelmek için etkileşimli bir balküpu tabanlı sistem önermiştir. Bu sistem, ekipman ve bilgi güvenliğini daha iyi korumak için saldırganın davranışını ve saldırı yöntemlerini gözlemlemek üzere saldırganları önceden belirlenmiş bir sanal alana çekmektedir. Priya ve Chakkaravarthy (2023) tarafından yapılan çalışmada saldırganların davranışlarını izlemek, analiz etmek ve değerlendirmek için bulut tabanlı araştırma balküpleri konuşlandırılmıştır. Çalışmanın sonuçlarında kötü niyetli kişilerin faaliyetleri ve amaçları hakkında önemli yargıların çıkarılabileceği sayısız veri noktası oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Son zamanlarda yapılan diğer bir çalışmada (Amal & Venkadesh, 2023), saldırgan davranışlarını tespit etmek ve saldırıları önlemek için Docker'da konuşlandırılan bir hibrit honeynet önerilmiştir. Önerilen modelin fidye yazılımlarını ve saldırı eğilimlerini tespit etmenin yanı sıra güvenlik duvarını da ayarladığı görülmektedir.

Bu çalışmada balküpu sistemleri ve balküpu sistemlerinin çeşitlerinden bahsedilmiş, balküpu uygulama çalışmaları yapılmış, balküpu sistemlerinin saldırgan (karşı balküpu) ve savunan taraf bakış açısı ile incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında karşı balküpu sistemleri kırmızı takım (saldırgan) odaklı olarak değerlendirilmiştir.

2. BALKÜPÜ SİSTEMLERİ VE ÇEŞİTLERİ

2.1. Balküpu Sistemleri

Balküpleri, siber suçluları herhangi bir yasadışı kullanım için ağı içerisine girmeye çalıştıklarında aldatmaya ikna etmek için kullanılan bir tür güvenlik sistemidir. Balküpleri, genellikle saldırganın ağdaki faaliyetini anlamak için kurulmaktadır. Balküplerinin temel amacı, kötü amaçlı trafiği önemli sistemlerden uzaklaştırmak, kritik sistemlere saldırı yapılmadan önce saldırıya karşı erken uyarı almak, saldırgan ve saldırı yöntemleri hakkında bilgi toplamaktır. Balküpleri kullanılarak bir saldırgan kritik olmayan ve iyi izlenen bir sisteme saldırısını gerçekleştirmesi için kandırılır. Ardından saldırganın saldırı yöntemleri hakkında değerli bilgiler

elde edilebilir ve bu bilgiler adli amaçlar için toplanabilir. Bu sayede kurum ağına izinsiz girişlere karşı daha güçlü önleme yöntemleri geliştirilebilir. Ayrıca balküpleri, ağ trafiğinin günlüğe kaydedilmesine yardımcı olan sahte bir vekil (proxy) olduğundan ve gerçek bir sistem olmadığından değerli veriler taşımazlar (Uitto ve ark., 2017). Balküpleri ile genellikle yakalanan veri çeşitleri;

- Saldırgan tarafından gerçekleştirilen girişler ve kullandığı tuşlar,
- Saldırganın IP adresi,
- Saldırgan tarafından kullanılan kullanıcı adları ve ayrıcalıkları,
- Saldırgan tarafından erişilen, ele geçirilen, silinen veya değiştirilen verilerin türü

şeklindedir.

2.2. Balküpü Çeşitleri

Balküpleri fikirsel olarak olası saldırıları önleme amaçlı geliştirilir. Bu doğrultuda ağ sistem altyapısı olan Windows, Linux, Android, PLC ve Scada gibi birçok sistemde kullanılabilirler. Balküpleri etkileşim seviyelerine göre;

- Düşük etkileşimli balküpleri,
- Orta etkileşimli balküpleri,
- Yüksek etkileşimli balküpleri,
- Saf balküpleri,

Geliştirilme amaçlarına göre;

- Araştırma balküpleri,
- Sistem balküpleri,

Aldatma amaçlarına göre;

- Zararlı yazılım balküpleri,
- Veritabanı balküpleri,
- Spam/gereksiz e-posta balküpleri,
- E-posta balküpleri,
- Örümcek balküpleri,
- Balküpü ağları,
- İstemci balküpleri

olarak incelenmiştir.

2.2.1. Etkileşim Seviyelerine Göre Balküpleri

2.2.1.1. Düşük Etkileşimli Balküpleri

Düşük etkileşimli balküpleri, ağda veya sistemde bulunan çok sınırlı sayıda hizmet ve uygulama ile eşleşirler. Bu tür balküpleri; Kullanıcı Veri Bloğu İletişim Kuralları (User Datagram Protocol-UDP), İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol-TCP) ve İnternet Kontrol Mesaj Protokolü (Internet Control Message Protocol-ICMP) bağlantı noktalarını ve hizmetlerini takip etmek için kullanılabilir. Burada, gerçek zamanlı olarak meydana gelebilecek saldırıları anlamak üzere saldırganları tuzağa düşürmek için sahte veritabanları, veriler ve dosyalar oluşturulabilmektedir. Düşük etkileşimli balküpü araçlarına örnek olarak; Honeytrap, Spectre, KFSensor vb. verilebilir (Al-Jameel ve ark., 2021).

2.2.1.2. Orta Etkileşimli Balküpleri

Orta etkileşimli balküpleri, gerçek zamanlı işletim sistemlerini taklit etmeye dayanmaktadır. Tüm uygulamalarına ve hizmetlerine bir hedef ağ olabilecek kadar sahiptirler. Amaçları

saldırmanı durdurmaktadır. Olduğundan daha fazla bilgi yakalama eğilimindedirler. Böylece kuruluş, tehde uygun şekilde yanıt vermek için daha fazla zaman kazanmaktadır. Orta etkileşimli balküpu araçlarına örnek olarak; Cowrie, HoneyPy vb. verilebilir.

2.2.1.3. Yüksek Etkileşimli Balküpleri

Yüksek etkileşimli balküpleri, bir sistemin genel olarak sahip olabileceği çeşitli uygulamalarla gerçek bir işletim sistemi üzerinde çalıştırılan gerçek savunmasız yazılımlardır. Bu balküpleri kullanarak toplanan bilgiler daha verimlidir ancak sürdürülmesi zordur. Yüksek etkileşimli balküpu araçlarına verilebilecek en güzel örnek ise honeynet'tir.

2.2.1.4. Saf Balküpleri

Saf balküpleri genellikle bir organizasyonun gerçek sistem ortamını taklit eder. Bu sayede saldırgan onun gerçek bir ortam olduğunu varsayar ve onu kullanmaya daha fazla zaman ayırır. Saldırgan güvenlik açıklarını bulmaya çalıştığında, kurum uyarılır ve böylece her türlü saldırı daha erken önlenir (Dalamagkas ve ark., 2019).

2.2.2. Geliştirilme Amaçlarına Göre Balküpleri

2.2.2.1. Araştırma Balküpleri

Araştırma balküpleri, etkileşimi yüksek balküpleridir. Ancak saldırganların davranışları hakkında daha fazla bilgi edinmek için çeşitli hükümet veya askeri kuruluşların alanlarında araştırma odağıyla oluşturulmuşlardır. Farklı ağları hedef alan saldırgan/Gelişmiş Sürekli Tehdit (Advanced Persistent Threat-APT) gruplarının amaçları ve saldırı taktikleri hakkında bilgi toplama, kuruluşların karşılaştıkları tehditleri araştırma ve kuruluşların bu tehditlere karşı daha iyi nasıl korunabileceklerini öğrenmek için kullanılırlar. Araştırma balküplerinin kurulumu ve bakımı zordur. Ayrıca daha kapsamlı bilgi tutarlar.

2.2.2.2. Sistem Balküpleri

Sistem balküpleri genellikle kuruluşun gerçek iç sistem ağına kurulur ve kısıtlı bilgi içerirler. Bu balküpleri genel olarak diğer sistem sunucuları ile sistem iç ağına yerleştirilir. Genelde kurulumu ve kullanımı daha kolay olan, düşük etkileşimli balküpleridir. Araştırma balküplerine kıyasla saldırılar ve saldırganlar hakkında daha az bilgi elde ederler. Ayrıca dahili olarak ağda mevcut olduklarından herhangi bir dahili güvenlik açığını veya saldırıyı bulmaya yardımcı olurlar (Borkar ve ark., 2011).

2.2.3. Aldatma Amaçlarına Göre Balküpleri

2.2.3.1. Zararlı Yazılım Balküpleri

Bir ağdaki zararlı yazılımları tuzağa düşürmek için kullanılan balküpleridir. Amaçları, saldırganı veya herhangi bir zararlı yazılımı cezbetmek ve saldırı modelini anlamak için kullanılacakları belirli saldırıları gerçekleştirmelerine izin vermektir. Bunlar, zararlı yazılımları tespit etmek için bilinen çoğaltma ve saldırı vektörlerini kullanabilir. Örneğin, yetkisiz değişikliklerin kanıtı için kontrol edilebilen bir USB sürücüsünü taklit etmek için balküpu yapılabilir (Nawrocki ve ark., 2016).

2.2.3.2. Veritabanı Balküpleri

Veritabanı balküpleri, adından da anlaşılacağı üzere savunmasız olan ve genellikle SQL enjeksiyonları gibi saldırıları çeken gerçek veritabanları gibi görünürler. Saldırganları, kuruma gerçekleştirilen saldırıların modelini anlamasını sağlayacak şekilde kredi kartı bilgileri gibi hassas bilgiler içerebileceklerini düşünmeye ikna etmeyi amaçlarlar.

2.2.3.3. Spam/Gereksiz E-Posta Balküpleri

Spam/gereksiz e-posta balküpleri, spam gönderenleri savunmasız e-posta öğelerinden yararlanmaya çekmek ve bunlar tarafından gerçekleştirilen etkinlikler hakkında ayrıntılar vermek için sahte e-posta sunucularından oluşurlar. Açık posta geçişlerini ve açık proxy'leri taklit etmek için kullanılabilir. Spam/gereksiz e-posta gönderenler önce kendilerine bir e-posta göndererek açık posta aktarımını test edeceklerdir ve bu başarılı olursa, büyük miktarlarda spam/gereksiz e-posta göndereceklerdir. Spam/gereksiz e-posta balküpleri testi algılayıp tanıyabilir ve ardından gelen çok büyük miktardaki spam/gereksiz e-postaları başarıyla engelleyebilir (Campbell ve ark., 2015).

2.2.3.4. E-Posta Balküpleri

E-posta balküpleri, internetteki saldırganları çekmek için kullanılan sahte e-posta adresleridir. Herhangi bir kötü niyetli kişi tarafından alınan e-postalar izlenebilir, incelenebilir ve kimlik avı e-posta dolandırıcılıklarının düşmesine yardımcı olmak için kullanılabilir.

2.2.3.5. Örümcek Balküpleri

Örümcek balküpleri, web uygulamalarından önemli bilgileri çalma eğiliminde olan çeşitli web gezginlerini ve örümcekleri tuzağa düşürmek amacıyla kurulmaktadır.

2.2.3.6. Balküpü Ağları

Balküpü ağları, saldırganların faaliyetlerini kaydetmek ve potansiyel tehditleri anlamak için sanal ve izole bir ortama çeşitli sunucularla birlikte kurulan ağlardır.

2.2.3.7. İstemci Balküpleri

Çoğu balküpü, bağlantıları dinleyen sunuculardan oluşurken istemci balküpleri, kötü amaçlı sunucuları aktif olarak arayan ve sistemlerde beklenmedik değişiklikleri izleyen istemci sistemleridir. Genellikle bu sistemler sanallaştırma teknolojisi ile çalışmaktadır. Böylece virüs bulaşmış sistemler enfeksiyon sonrası temizlenebilmektedir.

3. UYGULAMA ÇALIŞMASI

Uygulama çalışması esnasında kullanılan sistemler aşağıdaki gibidir:

- Honeydrive sanal balküpü laboratuvarı
- Kali-Linux

Honeydrive sisteminde kullanılan araçlar:

- Kippo balküpü sistemi
- Kippo Graph izleme sistemi
- Honeyd balküpü sistemi

- Dionaea balküpu sistemi
- DionaeaFR izleme sistemi

Kali-Linux sisteminde kullanılan araçlar:

- Nmap network ve zafiyet tarama aracı
- Medusa kaba kuvvet saldırı aracı
- Metasploit çoklu saldırı aracı
- Metasploit üzerinde bulunan karşı balküpu detect_kippo aracı

Uygulama çalışması üç sistemin test edilmesine dayanmaktadır. Bu adımlar aşağıdaki gibidir:

- İlk aşamada Honeydrive sisteminde bulunan Kippo honeypot ve Kippo izleme sistemi kurulmuştur. Daha sonra Kali-Linux sistemi üzerinden nmap aracı ile tarama çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde Güvenli Kabuk (Secure Shell-SSH) bağlantı portunun açık olduğu gözlemlenmiştir. Kaba kuvvet saldırılarına karşı açık olan SSH portuna root kullanıcısı ile parola denemeleri yapılmıştır. Basit parola olması nedeni ile kısa zamanda parola 123456 olarak tespit edilmiştir. Daha sonra user kullanıcısı ile denemeler yapılmıştır. Denemeler sonucu neticesiz kalmıştır. Parolası tespit edilen root kullanıcısı ile sisteme SSH bağlantısı yapılmıştır. Sistemde kritik dizelerde gezintiler yapılmıştır. Tüm bu saldırılar Kippo Graph izleme sistemi üzerinden takip edilmiştir. Metasploit aracı çalıştırılarak detect_kippo aracı ile hedef sistem taranmıştır. Sistemin balküpu olduğu tespit edilmiştir.
- İkinci aşamada da Honeydrive sisteminde bulunan Honeyd balküpu sistemi kurulmuştur. Bu kısımda sistem konfigürasyonları değiştirilerek sistemdeki değişiklikler loglar üzerinden gözlemlenmiştir.
- Üçüncü aşamada ise Honeydrive sisteminde bulunan Dionaea balküpu sistemi ve DionaeaFR izleme sistemi kurulmuştur. Dionaea sistemine karşı nmap aracı ile farklı çeşitlerde taramalar yapılmıştır. Tarama çalışmaları Dionaea sistemi üzerinden takip edilmiştir.

3.1. Kullanılan Sistemler

3.1.1. Honey Drive

BruteForce Laboratuvarı tarafından geliştirilen Honey Drive balküpu laboratuvarı farklı tiplerdeki balküplerini ve adli bilişim araçlarını bünyesinde bulundurmaktadır. Sistem üzerindeki balküplerinden istenilen balküpünün seçilerek kullanımına ve izlenmesine olanak sağlamaktadır.

3.1.1.1. Kippo

Kippo orta etkileşimli bir balküpu sistemi olup, Kippo-Graph ve Kippo2MySQL sistemlerini ile de beraber çalışabilmektedir. SSH bağlantılarını üzerine çekmesi için geliştirilmiştir. Kippo-Graph aracı ile gerçekleştirilen bağlantı denemeleri ve başarılı bağlantılar sonrası gerçekleştirilen komutlar tespit edilip izlenebilmektedir. Farklı tablo formatlarında birçok görsel ile çeşitli istatistik sonuçlar verebilmektedir.

3.1.1.2. Honeyd

Honeyd balküpu sistemi düşük etkileşimli balküpleri arasındadır. Değişik konfigürasyon ayarlamaları yapılarak saldırganların ilk aşaması olan keşif adımıyla yanılmalarına olarak tanımaktadır. Bu sistem ile loglar üzerinden gerçekleştirilen port taramaları tespit edilebilmektedir.

3.1.1.3. Dionaea

Dionaea, zararlı yazılımları ve zafiyetlerden yararlanarak saldırı girişiminde bulunan saldırganları tespit etme amaçlı geliştirilmiştir. Orta etkileşimli bir balküpüdür. DionaeaFR izleme aracı ile sistem üzerinde gerçekleştirilen taramalar, bağlantılar, zararlı bağlantılar, URL adresleri, zararlı yazılımlar, saldırganlar ve IP lokasyon bilgileri izlenebilmektedir.

3.1.2. Kali-Linux

Kali Linux, gelişmiş sızma testi ve güvenlik denetimini hedefleyen açık kaynak kodlu Debian tabanlı bir Linux dağıtımdır. Kali Linux; sızma testi, güvenlik araştırması, adli bilişim ve tersine mühendislik gibi çeşitli bilgi güvenliği çalışmalarına yönelik 600'den fazla araç içermektedir.

3.1.2.1. Nmap

Nmap (Network Mapper), ağ keşfi ve güvenlik denetimleri için geliştirilmiş ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir araçtır. Nmap, ağ üzerinde;

- hangi bilgisayarların kullanılabilir olduğunu,
- bu bilgisayarların hangi hizmetleri (uygulama adı ve sürümü) sunduğunu,
- hangi işletim sistemlerini (ve işletim sistemi sürümlerini) çalıştırdıklarını,
- ve bu sistemlere ait zafiyetleri,

tespit etmek amaçlı kullanılır.

3.1.2.2. Medusa

Medusa, kaba kuvvet saldırıları için geliştirilmiş hızlı, paralel ve modüler bir oturum açma aracıdır. Uzaktan kimlik doğrulamaya izin veren çok sayıda hizmeti desteklemekte ve paralel testler ile aynı anda birçok deneme gerçekleştirebilmektedir. Kaba kuvvet testi, aynı anda birden fazla ana bilgisayara, kullanıcıya veya parolaya karşı gerçekleştirilebilir. Esnek kullanıcı girdilerine olanak tanır. Hedef bilgileri (ana bilgisayar/kullanıcı/şifre) çeşitli şekillerde belirlenebilir. Örneğin, her öge tek bir girdi veya birden çok girdi içeren bir dosya olabilir. Çoklu protokoller desteklenmektedir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir;

- Sunucu İleti Bloğu (Service Message Block-SMB): Sunucu ve istemci arasındaki iletişimi sağlayan ağ protokolüdür.
- Hiper Metin Transfer Protokolü (Hyper Text Transfer Protocol-HTTP): Web sistemlerinde, kullanıcı ile sunucu arasındaki protokoldür.
- Microsoft Yapılandırılmış Sorgu Dili (Microsoft Structured Query Language-MS-SQL): Microsoft tabanlı veritabanları için haberleşme protokolüdür.
- Uzak Masaüstü Protokolü (Remote Desktop Protocol-RDP): Uzak masaüstü bağlantısı için kullanılan protokoldür.
- Güvenli Kabuk sürüm 2 (Secure Shell version 2-SSHv2): Güvenli kabuk bağlantıları için şifreli bir trafik kullanmak için geliştirilmiş protokoldür.

3.1.2.3. Metasploit

Metasploit platformu, saldırganlar ve sızma testi çalışmaları yapan siber güvenlik uzmanları tarafından kullanılmaktadır. Sistemlerdeki açıklıkları tespit amaçlı kullanılır. Özellikle sistemde tespit edilen bir açığın sistemde var olup olmadığını kontrol ve istismar etme amaçlı kullanılır. İstismar kodları, zararlı kodlar, ek fonksiyonlar, port dinleyicileri, kabuk kodları, istismar sonrası kullanılan kodları gibi birçok modülden oluşmaktadır. Bunlarla beraber sistemleri tespit modülleri de bulunmaktadır.

3.1.2.4. Detect_kippo

Metasploit üzerindeki ek modüllerden biri olan detect_kippo aracı Kippo sistemine odaklanmaktadır. Karşı balküpu sistemlerinden olan bu araç çalışma prensibi olarak aşağıdaki yolları izler;

- i. Karşı sisteme SSH bağlantı denemesi yapar,
- ii. Open SSH protokolü desteğini sorgular,
- iii. Balküpu sistemleri tarafından kullanılan varsayılan bayrak dönüşü olursa balküpu tespitini yapar.

3.2. Uygulama Çalışmaları

3.2.1. Kippo Honeypot, İzleme ve Tespit Uygulama Çalışması

3.2.1.1. Kurulum

Aşağıdaki komut yazılarak kurulum yapılır.

```
./honeydrive/kippo/start.sh
```

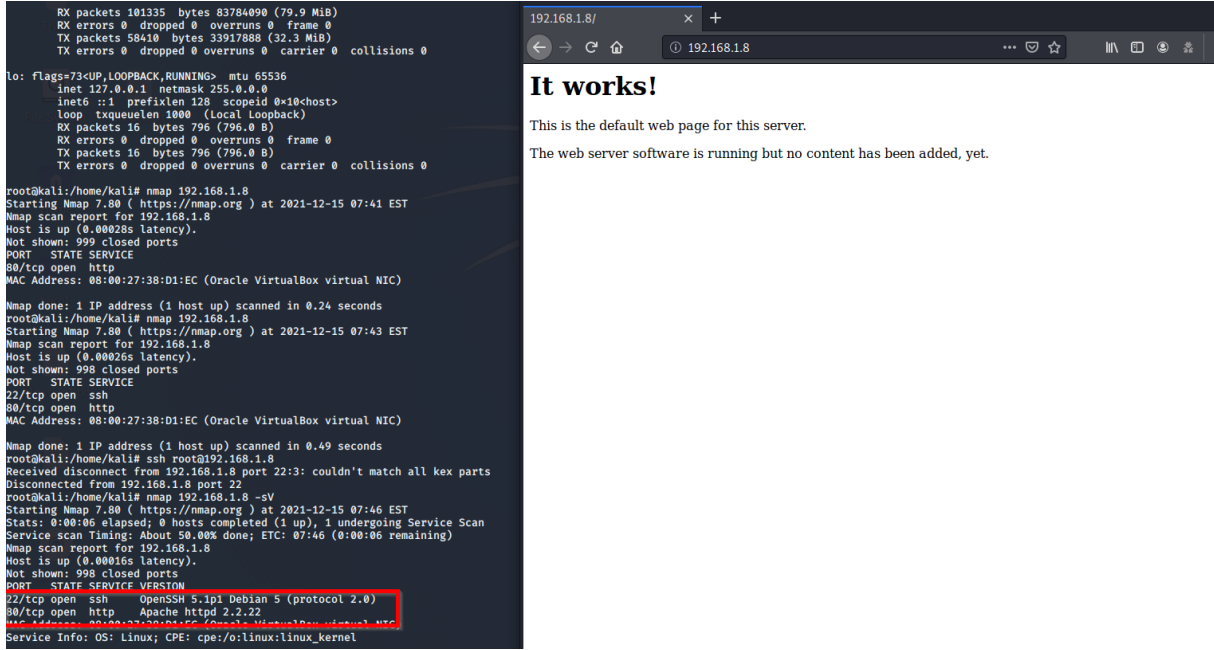
3.2.1.2. Test Çalışması

Kali Linux üzerinden nmap aracı ile Kippo sistemine tarama çalışması yapılır (Şekil 1).

```
ifconfig  
nmap <<Hedef Sistem IP adresi>> -sV
```

Tarama sonrası sistem üzerinde 22/SSH portunun açık olduğu gözlemlenmiştir. Bunun üzerine medusa aracı kullanılarak root ve user kullanıcıları için kaba kuvvet denemeleri gerçekleştirilmiştir. Root kullanıcıasına ait parola “123456” olarak tespit edilmiştir. Kaba kuvvet deneme komutları;

```
medusa -h <<Hedef IP adresi>> -u <<Kullanıcı adı>> -P <<kullanılan parola listesi>>
```



```

RX packets 181335 bytes 85784090 (79.9 MiB)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 58410 bytes 33917888 (32.3 MiB)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

lo: flags=73<UP,LOOPBACK,RUNNING> mtu 65536
    inet 127.0.0.1 netmask 255.0.0.0
    inet6 ::1 prefixlen 128 scopeid 0<1<host>
    loop txqueuelen 1000 (Local Loopback)
RX packets 16 bytes 796 (796.0 B)
RX errors 0 dropped 0 overruns 0 frame 0
TX packets 16 bytes 796 (796.0 B)
TX errors 0 dropped 0 overruns 0 carrier 0 collisions 0

root@kali:/home/kali# nmap 192.168.1.8
Starting Nmap 7.80 ( https://nmap.org ) at 2021-12-15 07:41 EST
Nmap scan report for 192.168.1.8
Host is up (0.00028s latency).
Not shown: 999 closed ports
PORT      STATE SERVICE
80/tcp    open  http
MAC Address: 08:00:27:38:D1:EC (Oracle VirtualBox virtual NIC)

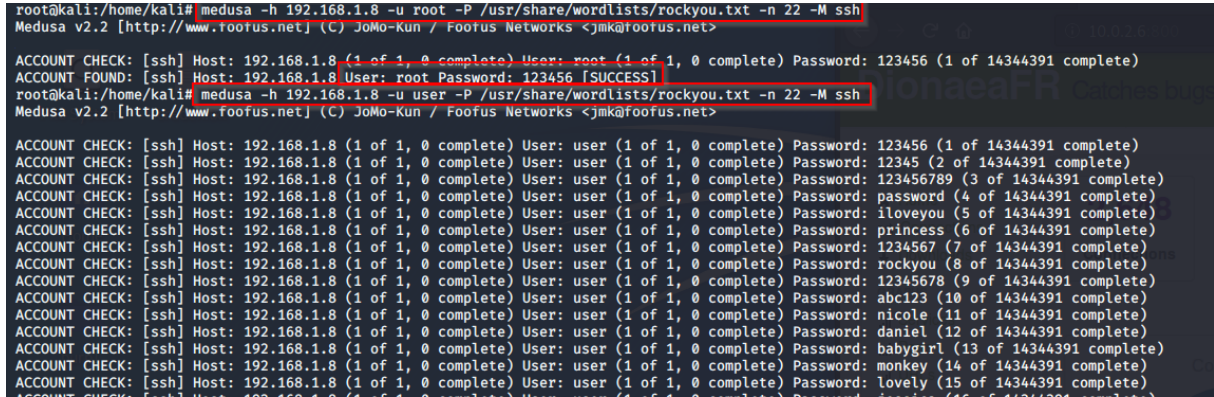
Nmap done: 1 IP address (1 host up) scanned in 0.24 seconds
root@kali:/home/kali# nmap 192.168.1.8
Starting Nmap 7.80 ( https://nmap.org ) at 2021-12-15 07:43 EST
Nmap scan report for 192.168.1.8
Host is up (0.00026s latency).
Not shown: 998 closed ports
PORT      STATE SERVICE
22/tcp    open  ssh
80/tcp    open  http
MAC Address: 08:00:27:38:D1:EC (Oracle VirtualBox virtual NIC)

Nmap done: 1 IP address (1 host up) scanned in 0.49 seconds
root@kali:/home/kali# ssh root@192.168.1.8
Received disconnect from 192.168.1.8 port 22:3: couldn't match all key parts
Disconnected from 192.168.1.8 port 22
root@kali:/home/kali# nmap 192.168.1.8 -sV
Starting Nmap 7.80 ( https://nmap.org ) at 2021-12-15 07:46 EST
Stats: 0:00:06 elapsed; 0 hosts completed (1 up), 1 undergoing Service Scan
Service scan Timing: About 50.00% done; ETC: 07:46 (0:00:06 remaining)
Nmap scan report for 192.168.1.8
Host is up (0.00016s latency).
Not shown: 998 closed ports
PORT      STATE SERVICE VERSION
22/tcp    open  ssh      OpenSSH 5.1p1 Debian 5 (protocol 2.0)
80/tcp    open  http     Apache/2.2.22
MAC Address: 08:00:27:38:D1:EC (Oracle VirtualBox virtual NIC)
Service Info: OS: Linux; CPE: cpe:/o:linux:linux_kernel

```

Şekil 1. Kippo – Nmap Taraması

Kaba kuvvet saldırıları ile SSH parola tespiti sağlanmıştır (Şekil 2).



```

root@kali:/home/kali# medusa -h 192.168.1.8 -u root -P /usr/share/wordlists/rockyou.txt -n 22 -M ssh
Medusa v2.2 [http://www.fooofus.net] (C) JoMo-Kun / Fooofus Networks <jmk@fooofus.net>

ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: root (1 of 1, 0 complete) Password: 123456 (1 of 14344391 complete)
ACCOUNT FOUND: [ssh] Host: 192.168.1.8 User: root Password: 123456 [SUCCESS]
root@kali:/home/kali# medusa -h 192.168.1.8 -u user -P /usr/share/wordlists/rockyou.txt -n 22 -M ssh
Medusa v2.2 [http://www.fooofus.net] (C) JoMo-Kun / Fooofus Networks <jmk@fooofus.net>

ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: 123456 (1 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: 12345 (2 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: 123456789 (3 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: password (4 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: iloveyou (5 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: princess (6 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: 1234567 (7 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: rockyou (8 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: 12345678 (9 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: abc123 (10 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: nicole (11 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: daniel (12 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: babygirl (13 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: monkey (14 of 14344391 complete)
ACCOUNT CHECK: [ssh] Host: 192.168.1.8 (1 of 1, 0 complete) User: user (1 of 1, 0 complete) Password: lovely (15 of 14344391 complete)

```

Şekil 2. Kippo – Medusa SSH Bağlantısı Kaba Kuvvet Denemesi

Tespit edilen parola ile sisteme SSH bağlantısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Dizinlerde geçişler yapılmış ve kritik dosyalara erişim sağlanmıştır.

```

root@kali://usr/share/wordlists# ssh -o KexAlgorithms+=diffie-hellman-group1-shal -c 3des-cbc root@192.168.1.8
The authenticity of host '192.168.1.8 (192.168.1.8)' can't be established.
RSA key fingerprint is SHA256:OfedJtU1A4ScTPb/7hzg+GggtLH/56BZskrD/iw0KYk.
Are you sure you want to continue connecting (yes/no/[fingerprint])? yes
Warning: Permanently added '192.168.1.8' (RSA) to the list of known hosts.
Password:
root@svr03:~# ls
root@svr03:~# ls
root@svr03:~# cd ..
root@svr03:/# cd //
root@svr03:/# ls
lost+found vmlinuz  srv      sys      run      sbin     proc     mnt      bin      usr      tmp
dev
root@svr03:/# cd root
root@svr03:~# ls
root@svr03:~# cd
root@svr03:~# ls
root@svr03:~# cd ..
root@svr03:/# cd //
root@svr03:/# cd usr

```

Şekil 3. Kippo – SSH Bağlantısı

Kippo arayüzü kullanılarak gerçekleştirilen parola denemeleri gözlemlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Kippo – Bağlantı Denemelerinin Gözlemlenmesi

Çalıştırılan komutlar ile kritik dizinlerdeki dosyalar okunmuştur (Şekil 5).

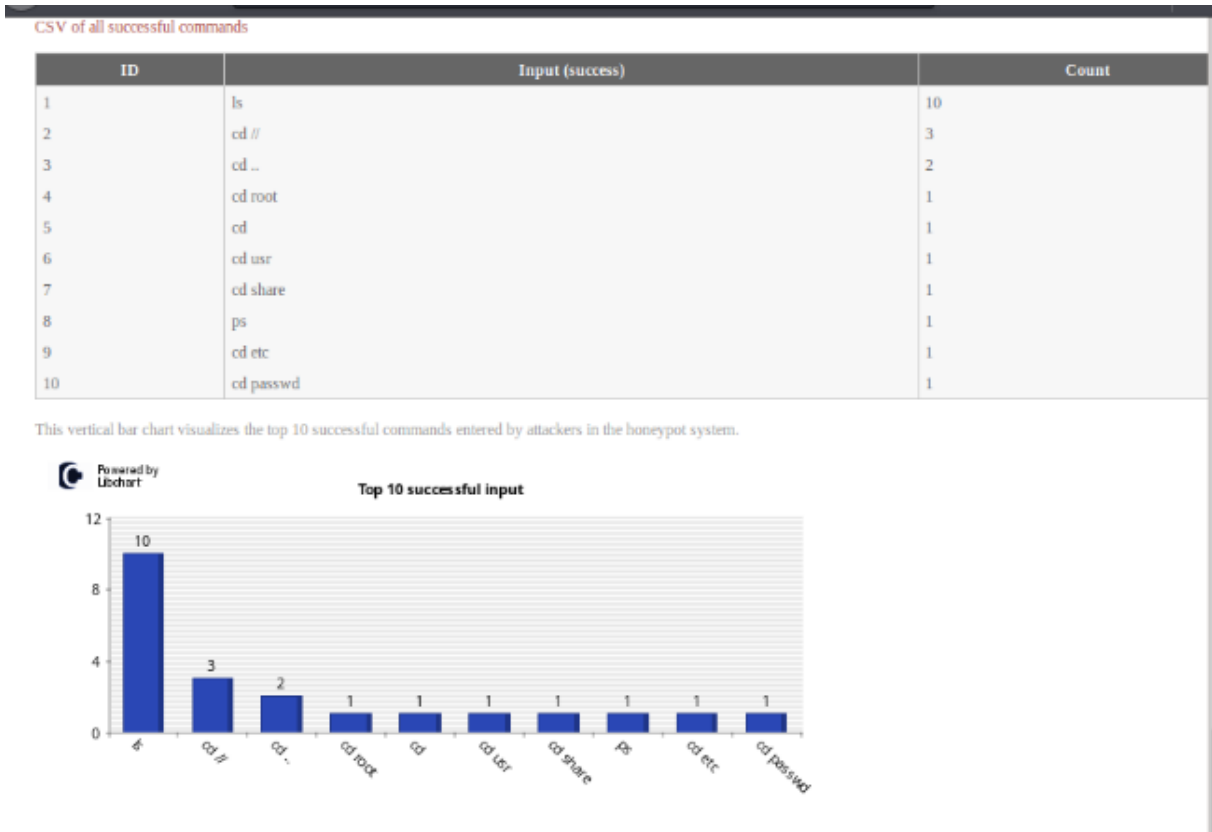
```

networks
root@svr03:/etc# cat passwd
root:x:0:0:root:/root:/bin/bash
daemon:x:1:1:daemon:/usr/sbin:/bin/sh
bin:x:2:2:bin:/bin:/bin/sh
sys:x:3:3:sys:/dev:/bin/sh
sync:x:4:65534:sync:/bin:/bin/sync
games:x:5:60:games:/usr/games:/bin/sh
man:x:6:12:man:/var/cache/man:/bin/sh
lp:x:7:7:lp:/var/spool/lpd:/bin/sh
mail:x:8:8:mail:/var/mail:/bin/sh
news:x:9:9:news:/var/spool/news:/bin/sh
uucp:x:10:10:uucp:/var/spool/uucp:/bin/sh
proxy:x:13:13:proxy:/bin:/bin/sh
www-data:x:33:33:www-data:/var/www:/bin/sh
backup:x:34:34:backup:/var/backups:/bin/sh
list:x:38:38:Mailing List Manager:/var/list:/bin/sh
irc:x:39:39:ircd:/var/run/ircd:/bin/sh
gnats:x:41:41:Gnats Bug-Reporting System (admin):/var/lib/gnats:/bin/sh
nobody:x:65534:65534:nobody:/nonexistent:/bin/sh
libuuid:x:100:101::/var/lib/libuuid:/bin/sh
sshd:x:101:65534::/var/run/sshd:/usr/sbin/nologin
richard:x:1000:1000:Richard Texas,,:/home/richard:/bin/bash
root@svr03:/etc#
shadow- shells shadow
root@svr03:/etc# cat shadow
root:$6$4a0mwdpJ$kyP0ik9rR0kSLyABIYNXgg/UqLWX3cieIaovOLWphShTGXmuUAMq6iu9DrcQqLVUw3Pirizns4u27w3Ugvb6.:15800:0:99999:7:::
daemon:*:15800:0:99999:7:::
bin:*:15800:0:99999:7:::
sys:*:15800:0:99999:7:::
sync:*:15800:0:99999:7:::
games:*:15800:0:99999:7:::
man:*:15800:0:99999:7:::

```

Şekil 5. Kippo – Kritik Dizinlerde Dolaşma

Çalıştırılan komutlar Kippo-Graph üzerinden de gözlemlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Kippo – Çalıştırılan Komutların Kippo-Graph Üzerinden Gözlemlenmesi

3.2.1.3. Tespit Çalışması

Kali Linux üzerinde Metasploit aracı çalıştırılmıştır. Metasploit üzerinde bulunan detect_kippo aracı ile hedef sistem taranmıştır. Balküpu olduğu tespit edilmiştir. Kullanılan komutlar aşağıdaki gibidir:

```
search kippo
use 0
show options
set rhosts <<Hedef IP adresi>>
run
```

Metasploit platformunda bulunan detect_kippo aracı çalıştırılarak balküpu tespiti sağlanmıştır (Şekil 7).

```
Module options (auxiliary/scanner/ssh/detect_kippo):
-----
Name      Current Setting  Required  Description
-----
RHOSTS    10.0.2.6         yes       The target host(s), range CIDR identifier, or hosts file with
RPORT     22               yes       The target port (TCP)
THREADS   1                yes       The number of concurrent threads (max one per host)

msf5 auxiliary(scanner/ssh/detect_kippo) > set rhosts 10.0.2.6
rhosts => 10.0.2.6
msf5 auxiliary(scanner/ssh/detect_kippo) > run
[+] 10.0.2.6:22 - 10.0.2.6:22 - Kippo detected!
[+] 10.0.2.6:22 - Scanned 1 of 1 hosts (100% complete)
[+] Auxiliary module execution completed
```

Şekil 7. Kippo – Balküpu Tespiti

3.2.2. Honeyd Balküpu Uygulama Çalışması

3.2.2.1. Kurulum ve Konfigürasyon

“/etc/honeypot/huten-honey.conf” dizininde bulunan konfigürasyon dosyasına ait bilgiler aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Konfigürasyon dosyasına gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra aşağıdaki komutlar ile balküpu sistemler çalıştırılmıştır.

```
create winxp
set winxp personality "Microsoft Windows XP Professional SP1"
add winxp tcp port 23 "perl /usr/share/honeyd/scripts/telnet/faketelnet.pl"
add winxp tcp port 139 open
add winxp tcp port 137 open
add winxp udp port 135 open
set winxp default tcp action reset
set winxp default icmp action open
set winxp ethernet "15:05:5E:81:19:0A"
set winxp default udp action reset
bind 10.0.2.11 winxp
create cisco
set cisco personality "Cisco I601R router running IOS 12.1(5)"
add cisco tcp port 23 "perl /usr/share/honeyd/scripts/router-telnet.pl"
set cisco default tcp action reset
set cisco default udp action reset
set cisco uid 32767 gid 32767
set cisco ethernet "69:38:97:29:AB:56"
bind 10.0.2.10 cisco
sudo honeyd -d -i eth0 -f /etc/honeypot/huten-honey.conf -l /var/log/honeypot/honeyd.log
```

Oluşturulan sistemler Kali Linux üzerinden nmap kullanılarak ağ taraması ile gözlemlenmiştir (Şekil 8).

```
Nmap scan report for 10.0.2.10
Host is up (0.0051s latency).
Not shown: 1999 closed ports
PORT      STATE SERVICE
23/tcp    open  telnet
MAC Address: 69:38:97:85:3D:61 (Unknown)

Nmap scan report for 10.0.2.11
Host is up (0.0052s latency).
Not shown: 1997 closed ports
PORT      STATE SERVICE
23/tcp    open  telnet
139/tcp   open  netbios-ssn
135/udp   open|filtered msrpc
MAC Address: 15:05:5E:39:90:FD (Unknown)

Nmap done: 2 IP addresses (2 hosts up) scanned in 2.23 seconds
```

Şekil 8. Honeyd – Nmap ile Port ve Servis Tespiti

3.2.3. Dionaea Honeypot ve İzleme Uygulama Çalışması

3.2.3.1. Kurulum

Aşağıdaki komutu çalıştırılarak Dionaea balküğü sistemi kurulur.

```
./honeydrive/dionaea-vagrant/runDionaea.sh
```

Balküğü üzerindeki etkileşimleri gözlemlemek için DionaeaFR izleme aracı kurulumu yapılır.

```
cd /honeydrive/DionaeaFR
python manage.py collectstatic
python manage.py runserver <<Sistem IP adresi>>:<<hizmet verilecek port>>
```

3.2.3.2. Test ve İzleme Çalışması

Kurulum sonrası Kali Linux üzerinden nmap aracı ile zafiyet, port, servis ve versiyon taraması yapılır (Şekil 9)

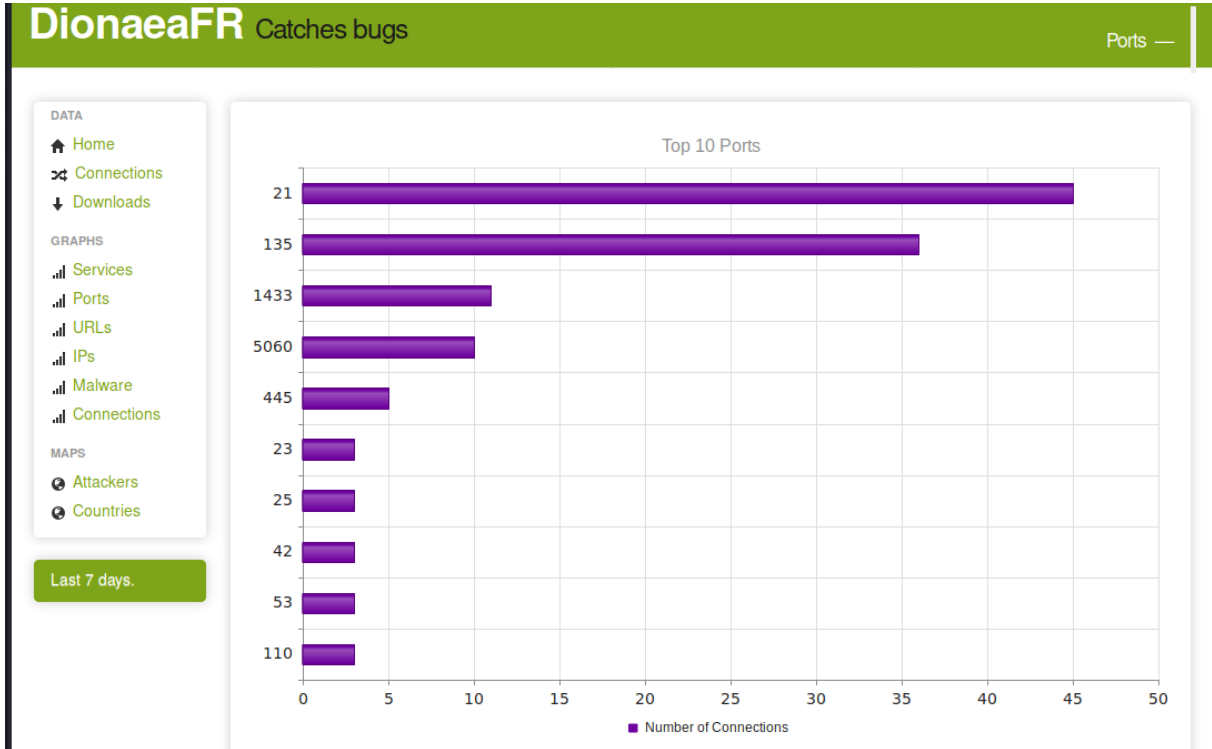
```

root@kali:/home/kali# nmap 10.0.2.6 -p- -A -sV -sC
Starting Nmap 7.80 ( https://nmap.org ) at 2021-12-16 07:37 EST
Nmap scan report for 10.0.2.6
Host is up (0.00045s latency).
Not shown: 65524 closed ports
PORT      STATE SERVICE      VERSION
21/tcp    open  ftp          Dionaea honeypot ftpd
|_ftp-anon: Anonymous FTP login allowed (FTP code 230)
22/tcp    open  ssh          OpenSSH 5.1p1 Debian 5 (protocol 2.0)
|_ssh-hostkey:
|_ 1024 14:d3:8f:4f:26:37:fd:da:76:6e:b9:3f:c5:4b:3c:f1 (RSA)
42/tcp    open  tcpwrapped
80/tcp    open  http         Apache httpd 2.2.22
|_http-server-header: Apache/2.2.22
|_http-title: Site doesn't have a title (text/html).
135/tcp   open  msrpc?
443/tcp   open  ssl/https?
|_ssl-date: 2021-12-16T12:40:37+00:00; 0s from scanner time.
445/tcp   open  microsoft-ds Dionaea honeypot smb
800/tcp   open  http         WSGIServer 0.1 (Python 2.7.3)
|_http-server-header: WSGIServer/0.1 Python/2.7.3
|_http-title: DionaeaFR - Home
1433/tcp  open  ms-sql-s     Dionaea honeypot MS-SQL server
5060/tcp  open  honeypot     Dionaea Honeypot sipd
5061/tcp  open  ssl/sip-tls?
|_ssl-date: 2021-12-16T12:40:37+00:00; 0s from scanner time.
MAC Address: 08:00:27:38:D1:EC (Oracle VirtualBox virtual NIC)
Device type: general purpose
Running: Linux 3.X
OS CPE: cpe:/o:linux:linux_kernel:3
OS details: Linux 3.2 - 3.16
Network Distance: 1 hop
Service Info: OS: Linux; CPE: cpe:/o:linux:linux_kernel

```

Şekil 9. Dionaea – Nmap Taraması

Nmap aracı ile hedef sistemin tüm portları taranmıştır. DionaeaFR ile ilgili taramalar izlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Dionaea – DionaeaFR Üzerinden Portlara Gelen İstek Sayıları

4. SALDIRI VE SAVUNMA AÇISINDAN BALKÜPLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Balküpleri, saldırganlar için hedef haline getirilmekte ve kuruluma bağlı olarak tespit edilmesi genellikle zor olabilmektedir. Yüksek etkileşimli bir balküpe, gerçek bir sistemin çalışması için beklenebilecek her şeyi çalıştırmakta ve bu nedenle tespit edilmesi çok zor olabilmektedir. Düşük etkileşimli bir balküpeünün ise, saldırgan içerideyken tespit edilmesi oldukça kolaydır. Düşük etkileşimli bir balküpe; basit işlemlere sahip olacak, birçok temel araç eksiklikleri barındıracak veya beklendiği gibi çalışmayacaktır. Bu durum da saldırganın balküpeününü tespit etmesine neden olacaktır. Tüm bu olasılıklar tamamen balküpeünün nasıl kurulduğuna bağlıdır. Balküpelerini tespit etmek için kesin olarak belirlenmiş bir yöntem yoktur. Balküpelerini tespit etmek için belirli bir yöntem keşfedilirse, yöntemi geçersiz kılmak için hemen yeni balküpeleri duruma göre geliştirilecektir (Uitto ve ark., 2017).

4.1. Savunma Açısından Balküpepleri

Siber savunmada balküpeplerinin kuşkusuz birçok faydası bulunmaktadır. Kurum güvenliğinde kullanılan cihazlar arasında duruma göre güvenlik duvarları, web uygulama güvenlik duvarı, Dağıtık Hizmet Reddi (Distributed Denial of Service-DDOS) atağı engelleme cihazı, yeni nesil antivirüsler, Sandbox'lar, ağ güvenlik cihazları, Güvenlik Bilgileri ve Olay Yönetimi (Security Information and Event Management-SIEM), Güvenlik Düzenleme, Otomasyon ve Müdahale (Security Orchestration, Automation and Responce-SOAR) gibi dışarıdan gelebilecek saldırıları karşılamak, yönetmek, engellemek amaçlı birçok sistem bulunmaktadır. Tüm bu sistemlerle beraber balküpepleri iç ağı yerleştirilerek olası bir saldırıda sisteme alarm üretmektedir. İçeri sızan bir saldırganı balküpepleri ile tespit etmek kurumların ciddi kayıplar vermesini engellemektedir.

Balküpeplerinin ağı yerleştirildikten sonra sağladığı avantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Balküpeplerinin herhangi bir trafiğe sahip olmaması gerekmektedir. Eğer üzerinde herhangi bir trafik var ise bu kötü amaçlıdır. Bu sayede daha az hatalı alarm sonucu alınabilmektedir.
- Saldırı anında tüm trafikteki verileri toplamak yerine sadece adli verileri toplayarak daha küçük ve yüksek değerli veri kümelerinin oluşturulmasına olanak tanımaktadır.
- Saldırıları kritik olmayan hatta kullanım dışı bir sisteme yönlendirerek saldırganın zamanını boşa harcamasına sebep olabilir ve bu sayede saldırı hakkında erken uyarı alınmış olur.
- IDS'lerin aksine bilinen saldırı imzaları gerektirmez.

Balküpe konfigürasyonları gerçekleştirilirken dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıdaki gibidir:

- Konumlandırması yapılacak balküpeünün bulunduğu alt ağdaki (subnet) ve alan adındaki (domain) makinalarla benzerlik teşkil etmesi gerekmektedir. Makine adı sistemdeki makine isimleri ile benzer olmalı, benzer portlar aktif olmalı ve servisler çalışmalıdır. Kurum politikasına bağlı olarak IP adres bloğuna göre kullanıcı isimlendirmeleri yapılmalıdır.
- Sistemlerde oluşan alarmlar ve konfigürasyonlar düzenlenmelidir. Aksi halde birçok alarm alınır ve bu da siber güvenlik takımının gereksiz yere çaba harcamasına sebep olur. Sonuç olarak sistemin verimliliği düşmüş olur.

Balküpe tespit araçlarının kaynak kodları incelendiğinde varsayılan ayarları kontrol ederek tespit etme işlemlerini gerçekleştirdikleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle konfigürasyonlar kurum politikalarına göre düzenlenmelidir.

4.2. Saldırı Açısından Balküpleri

Siber savunmada savunma takımı ve savunma cihazları ne kadar önemli ise saldırı takımı da yani saldırgan bakış açısı ile sistemi test etmek de en az o kadar önemlidir. Bu nedenle balküpleri, sisteme yerleştirilirken aynı zamanda istismarları ve atlatma yöntemleri de düşünülerek tasarım yapılması gerekmektedir. En önemli ve can alıcı noktayı bu adım oluşturmaktadır. Çünkü bir sistemin güvenliğinden bahsedildiğinde bu sistemin saldırgan bakışı ile atlatılarak limitlerinin bilinmesi gerekmektedir. Karşı balküpleri sistemleri ve çalışmaları da kıvılcık takım tatbikatları esnasında gelişmektedir. Bazıları da saldırganlar tarafından saldırılarını kolaylaştırma amaçlı geliştirilirler.

Saldırgan bakışı ile bakıldığında; neler çalışıyor, hangi teknolojileri kullanmakta, kimler çalışıyor, hangi algoritmaları kullanıyor, hangi portlar açık bilmek gereklidir. Bu konu daha çok savunma tarafı değil de saldırı tarafı için önemlidir. Bir sisteme sızma testi gerçekleştirilirken o sistemde balküpüne yakalanma oranı yüksektir. Ayrıca iyi kurgulanmış ve amacına uygun konfigüre edilmiş bir balküpu gerçekten tespit edilemez bile olabilir. Bu bilgilere göre karşı balküpu sistemleri geliştirilebilir.

Balküplerinin tespiti zordur. Çünkü emülasyon olsa bile saldırganı gerçek bir sistemmiş gibi gözükebilir. Balküplerini tespit etmek için bazı karşı balküpu yazılımları bulunmaktadır. Bunlardan öne çıkan yazılım Send-Safe HoneyPot Hunter'dır. Bunun gibi yazılımlar portları ve portlarda çalışan servisleri analiz ederek sistemin gerçek veya tuzak bir sistem olup olmadığını anlamaya yarayan araçlardır. Diğer bir karşı balküpu yazılımı ise Nessus'tur. Bu da uzak sistemde balküpu olup olmadığını tespit etmek için sistemi analiz eden bir yazılımdır. Ayrıca metasploit modülünde bulunan karşı balküpu araçlarından olan detect_kippo aracı kullanılarak ilgili testler gerçekleştirilebilir.

Savunma bakış açısı ile balküpu sistemlerinin tasarlanması için dikkat edilmesi gereken hususlar yine aynı şekilde saldırgan bakış açısı için de geçerlidir. Benzer şekilde aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi gerekmektedir:

- Açık portlar, çalışan servisler, uygulamalar kontrol edilir ve bariz bir zafiyet varsa diğer sistemler ile karşılaştırılır. Buna göre balküpu kestirimi yapılır ve uygun karşı balküpu sistemi ve tekniği denir.
- IP adresi, makine isimleri, alan adları ve kullanıcı isimleri gibi diğer makinelerle karşılaştırmalar yapılır.

Benzer karşılaştırmalar yapılarak ilgili makinelerin sistem ile entegrasyonu incelenir. Bu sayede ilk aşama olan balküpu şüphesi oluşturulabilir. Şüphenin oluşması ile geri kalan aşamalar hızlı bir şekilde gelişir. Balküplerindeki amaç saldırganı şüphelendirmemek olduğu için tüm ayrıntılara dikkat edilmelidir.

5. SONUÇ

Bu çalışmanın amacı balküplerinin kurumsal ağ sistemlerindeki önemini vurgulamak ve saldırgan/savunan taraf bakış açısının değerlendirilerek balküplerinin geliştirilmesini sağlamaktır. Saldırıları tespit amaçlı birçok sistem bulunmaktadır. Ancak balküplerinin çeşitli varyasyonları bu tespit verilerini zenginleştirmekte ve saldırganın enerjisini boşa harcamasını sağlamaktadır. Bu çalışmada karşı balküpu sistemleri kullanılarak tavsiye edilen adımlar uygulanmadan entegre edilen balküplerinin nasıl kolayca tespit edilebildiği gösterilmiştir. Ayrıca balküpleri saldırı ve savunma bakış açısı ile incelenerek, literatür ve tecrübelerden yola çıkılarak bir takım tavsiye niteliğinde değerlendirmelerde bulunulmuştur.

Günümüzde teknolojinin çeşitlenmesi ve gelişmesi ile birçok farklı alan oluşmaktadır. Benzer adımlar ve teknolojiler kullanılarak yeni teknolojilere karşı gerçekleştirilmesi muhtemel saldırılar için önceden önlemler alınabilir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, farklı saldırılar için balküpe sistemleri geliştirilebilir ve geliştirilen bu sistemler çeşitli senaryolar üzerinde test edilebilir.

Yazarların Katkısı

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

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Al-Jameel, S., & Alanazi, A. A. (2021). Honeypots Tools Study and Analysis. *International Journal of Computer Science & Network Security*, 21(1), 162-173.
- Amal, M. R., & Venkadesh, P. (2023). H-Doctor: Honeypot based firewall tuning for attack prevention. *Measurement: Sensors*, 25, 100664.
- Bagyalakshmi, G., Rajkumar, G., Arunkumar, N., Easwaran, M., Narasimhan, K., Elamaran, V., & Ramirez-Gonzalez, G. (2018). Network vulnerability analysis on brain signal/image databases using Nmap and Wireshark tools. *IEEE Access*, 6, 57144-57151.
- Borkar, A., Salunke, A., Barabde, A., & Karlekar, N. P. (2011, February, 25-26). *Honeypot: a survey of technologies, tools and deployment*. Proceedings of the International Conference & Workshop on Emerging Trends in Technology, India, 1357-1357.
- Bringer, M. L., Chelmecki, C. A., & Fujinoki, H. (2012). *A survey: Recent advances and future trends in honeypot research*. International Journal of Computer Network and Information Security, 4(10), 63-75.
- Campbell, R. M., Padayachee, K., & Masombuka, T. (2015, December, 14-16). *A survey of honeypot research: Trends and opportunities*. In 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST), IEEE, 208-212.
- Chen, P. T., Laih, C. S., Pouget, F., & Dacier, M. (2005, November, 07-09). *Comparative survey of local honeypot sensors to assist network forensics*. In First International Workshop on Systematic Approaches to Digital Forensic Engineering (SADFE'05), IEEE, 120-132.
- Dalamagkas, C., Sarigiannidis, P., Ioannidis, D., Iturbe, E., Nikolis, O., Ramos, F., ... & Tzovaras, D. (2019, June, 24-28). *A survey on honeypots, honeynets and their applications on smart grid*. In 2019 IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft), IEEE, 93-100.

- Denis, M., Zena, C., & Hayajneh, T. (2016, April, 29-29). *Penetration testing: Concepts, attack methods, and defense strategies*. In 2016 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT), IEEE, 1-6.
- Fan, W., Du, Z., Fernández, D., & Villagra, V. A. (2017). Enabling an anatomic view to investigate honeypot systems: A survey. *IEEE Systems Journal*, 12(4), 3906-3919.
- Grimes, R. A. (2005). Honeyd Configuration. *Honeypots for Windows*. Apress Berkeley, CA.
- Hong-Xia, L., Pu, W., Jian, Z., & Xiao-Qiong, Y. (2010, May, 7-9). *Exploration on the connotation of management honeypot*. In 2010 International Conference on E-Business and E-Government, IEEE, 1152-1155.
- Nawrocki, M., Wählich, M., Schmidt, T. C., Keil, C., & Schönfelder, J. (2016). A survey on honeypot software and data analysis, *arXiv preprint arXiv:1608.06249*.
- Ng, C. K., Pan, L., & Xiang, Y. (2018). *Honeypot frameworks and their applications: a new framework*. Springer, Singapore.
- Perevozchikov, V. A., Shaymardanov, T. A., & Chugunkov, I. V. (2017, February, 1-3). *New techniques of malware detection using FTP Honeypot systems*. In 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), IEEE, 204-207.
- Priya, V. D., & Chakkaravarthy, S. S. (2023). Containerized cloud-based honeypot deception for tracking attackers. *Scientific Reports*, 13(1), 1437.
- Sembiring, I. (2016, October, 19-20). *Implementation of honeypot to detect and prevent distributed denial of service attack*. In 2016 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), IEEE, 345-350.
- Sochor, T., & Zuzcak, M. (2014, June, 23-27). *Study of internet threats and attack methods using honeypots and honeynets*. In International Conference on Computer Networks, Springer, Cham, 118-127.
- Uitto, J., Rauti, S., Laurén, S., & Leppänen, V. (2017, April, 04-06). *A survey on anti-honeypot and anti-introspection methods*. In World Conference on Information Systems and Technologie, Springer, Cham, 125-134.
- Yang, X., Yuan, J., Yang, H., Kong, Y., Zhang, H., & Zhao, J. (2023). A Highly Interactive Honeypot-Based Approach to Network Threat Management. *Future Internet*, 15(4), 127.
- Zimmerman, C. (2014). Ten Strategies of a World-Class Cybersecurity Operations Centre. *The Mitre Corporation*, Ukrainian.



Araştırma Makalesi / Research Article

**MEŞE PALAMUDUNDAN ELDE EDİLEN DOĞAL BOYARMADDE İLE
PAMUK KUMAŞIN BOYANMASINA FARKLI MORDAN MADDELERİN
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT MORDANT AGENTS ON DYEING
OF COTTON FABRIC WITH NATURAL DYE OBTAINED FROM GALLNUT**

Nigar MERDAN¹

Şeyda EYÜPOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1089939>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
seyda.eyupoglu@iuc.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
18.03.2022

Kabul Tarihi / Accepted
29.08.2022

Öz

Bu çalışmada meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile pamuk kumaş numuneleri farklı mordan maddelerle ön-mordanlama işlemine tabi tutularak konvansiyonel yöntem ile boyanmıştır. Çalışma kapsamında mordan maddesi olarak kalay klorür (SnCl_2), demir III klorür (FeCl_3), potasyum alüminyum sülfat ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür, ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) kullanılmış, ve bu mordan maddelerin boyamaların renk ve haslık özelliklerine etkisi incelenmiştir. Farklı mordan maddelerin kullanımı ile numunelerde farklı renkler elde edilmiştir. Ayrıca mordan madde çeşidinin numunelerin yıkama, sürtme ve ışık haslığı değerleri üzerinde çok etkili olmadığı ve numunelerin haslık değerlerinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, meşe palamudundan elde edilen sürdürülebilir, ekolojik ve toksin olmayan doğal boyarmadde, tekstil malzemelerinin boyanmasında sentetik boyalara alternatif olarak kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Doğal boyarmadde, meşe palamudu, mordanlama, pamuk.

Abstract

In this study, cotton fabric samples were dyed by conventional method with natural dye obtained from gallnut after pre-mordanted with different mordant substance. Within the scope of the study, tin chloride (SnCl_2), iron III chloride (FeCl_3), potassium aluminum sulfate ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), potassium aluminum sulfate + iron III chloride, and potassium aluminum sulfate + iron III chloride + ascorbic acid ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) was used, and the effect of these mordant substances on the color and fastness properties of dyeing was investigated. Different colors were obtained in the samples by using different mordant substances. In addition, it was concluded that the mordant substance type was not very effective on the washing, rubbing and light fastness values of the samples and the fastness values of the samples were high. According to the results, sustainable, ecological, and non-toxic natural dyestuff obtained from gallnut can be used as an alternative to synthetic dyes in dyeing textile materials.

Keywords: Cotton, gallnut, mordanting, natural dye.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Moda ve Tekstil Tasarımı Bölümü, İstanbul, Türkiye.
nmerdan@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-7246-4849.

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil, Giyim, Ayakkabı ve Deri Bölümü, İstanbul, Türkiye.
seyda.eyupoglu@iuc.edu.tr, Orcid.org/0000-0003-4522- 2056.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda sıkça gündeme gelen sentetik boyarmaddelerin alerjik ve toksin olması nedeniyle, birçok ülkede uygulanan katı çevre düzenlemeleri sanayicileri ve araştırmacıları tekstil ve deri boyamacılığında doğal boyarmaddelerin kullanımının araştırılmasına yöneltmiştir. Doğal boyarmaddeler tarih öncesi zamanlardan bu yana deri, pamuk, yün, keten, ipek ve gıda malzemelerinin renklendirilmesinde kullanılmıştır. Ancak doğal boyarmaddelerin renk tonu sayısının sınırlı olması, renklerin tekrar üretiminin güç olması, zayıf renk haslıkları ve boyama yöntemlerinin standardizasyonundaki zorluklar kullanımlarını sınırlayan faktörlerdir. Bu nedenle doğal boyarmaddelerin tekstil sanayinde kullanımını artırmak için yeni doğal boyarmadde kaynaklarının bulunması ve geliştirilmesi, verimli ekstraksiyon teknikleri, mordanlama ve boyama koşullarının standardizasyonu ve haslık özelliklerinin iyileştirilmesi büyük öneme sahiptir (Hwang ve ark. 2008, Kamel ve ark. 2011, Kandasamy ve ark. 2021).

Literatürde doğal boyarmaddelerle tekstil malzemelerinin boyandığı birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların birçoğu doğal boya ekstraktesinde optimizasyon işlemlerini, boyama işleminde optimizasyonu ve tekstil malzemelerinin boyarmadde alımını artırmak için yapılan yüzey modifikasyon işlemlerini kapsamaktadır (Mahfoudhi ve ark. 2015, Mansour ve ark. 2017, Haji 2020). Kullanılan mordan maddeler, doğal boyarmadde kaynağı, spektrofotometrik ölçümleri ve yıkama haslığı değerlerini kapsayan bazı çalışmalar Tablo 1’ de özetlenmiştir.

Tablo 1. Doğal Boyarmaddelerin Kullanıldığı Bazı Çalışmalar

Mordan	Doğal boyarmadde kaynağı	Kolorimetrik özellikler			Yıkama haslığı Renk değişimi	Kaynak
		L*	a*	b*		
Potasyum alüminyum sülfat	<i>Hibiscus rosa sinensis</i>	41.97	40.11	2.71	4	Vankar & Shukla 2011
Kalay klorür	Yaban mersini	31.10	20.50	-6.50	4-5	Phan ve ark. 2020
Potasyum alüminyum sülfat	<i>T. populnea</i> meyvesi	75.88	2.24	25.60	1-2	Amutha & Sudhapriya 2020
Demir sülfat	<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.	74.80	3.40	-2.00	4	Shahmoradi ve ark. 2021
Demir sülfat	<i>Mucunam slonaei</i> F	20.86	13.39	9.25	4-5	Jabar ve ark. 2021
Demir sülfat	Mango tohumu çekirdeği	40.90	3.42	10.10	4-5	Islam ve ark. 2021
Potasyum alüminyum sülfat	Karpuz kabuğu	83.50	4.20	13.90	4	Liman ve ark. 2021
<i>E. officinalis</i> + Bakır sülfat	Kına	61.52	3.91	17.46	5	Prabhu ve ark. 2011
<i>E. officinalis</i> + Bakır sülfat	Nar kabuğu	60.93	4.79	21.27	5	Prabhu ve ark. 2011
Potasyum alüminyum sülfat	Söğüt kabuğu	59.90	16.30	37.00	-	Lohtander ve ark. 2020

Pamuk lifinden giyim malzemesi üretimi pamuk lifinin giyim konfor özelliklerinin yüksek ve yumuşak olması nedeniyle eski zamanlardan bu yana savunma, tıp ve spor alanlarda kullanımı bilim adamları ve sanayicilerin ilgisini çekmiştir. Ancak pamuk lifinden elde edilen mamüllerin doğal boyama teknolojisinde kullanımında, pamuk lifi zayıf boya etkileşimi, daha düşük boya alımı ve düşük renk haslığı gibi bazı yapısal sınırlamalara sahiptir. Protein lifleriyle karşılaştırıldığında, doğal boyarmaddelerle pamuk liflerinin boyanmasının zor oluşunun iki nedeni vardır. Bu nedenlerden ilki pamuk lifi selüloz esaslıdır ve selüloz boyarmadde nüfusunu azaltan yüksek kristalin bölge oranına sahiptir. Diğer neden ise pamuk lifinin monomeri, dehidrate olmuş hidroksil grupları ve negatif yüzey yoğunluğuna sahip eter bağları içeren D-glukopiranozdur. Bu yüksek negatif yük yoğunluğu, negatif yüklü polifenolik boyalarla boyama için uygun değildir.

Pamuk lifinin doğal boyarmaddelerle boyanmasında bu dezavantajların üstesinden gelmek için, son zamanlarda uygulanan ekolojik yüzey modifikasyonu stratejileri çok dikkat çekmektedir. Doğal boyarmaddelerle boyama işlemi öncesinde, pamuklu kumaşa uygulanan mordanlama, plazma, katyonizasyon, ultra-viole ışınması ve enzimatik işlemler bu stratejilerden bazılarıdır. Yüzey modifikasyonu, tekstil malzemelerinin alt tabakasına boyanabilirlik, ıslanabilirlik, renk haslığı, basılabilirlik ve diğer işlevleri kazandırmak için etkili bir yaklaşımdır. Ayrıca pamuk lifine uygulanan mordanlama işlemiyle pamuk lifi monomerinin doğal boyarmadde moleküllerine uyguladığı negatif itme kuvvetinin en aza indirilmesi amaçlanır (Zhang ve ark. 2022).

Meşe palamudu (*Quercus infectoria*), tanen sınıfı bileşiklerden zengin bir bitkidir. Yapısında oksokromik grup içeriği yüksek olan bitkinin polifenolik bileşikleri tekstil malzemelerinin boyanmasında biyo-mordan olarak kullanılmasının yanı sıra boyarmadde olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca meşe palamudu özütünün anti-diyabetik, anestetik, antiviral, antifungal, antibakteriyel, anti-inflamatuar ve yara iyileştirici özellikleri olduğu bulunmuştur. Meşe palamudu, tabaklama, mordanlama, boyama ve mürekkebin imalatında yaygın bir uygulama alanı bulmaktadır (Yusuf ve ark. 2017).

Bu çalışmada pamuk örme kumaş numunelerinin meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile boyanmasında boyama özelliklerine farklı mordan maddelerin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla numuneler ilk olarak farklı mordan maddelerle ön-mordanlama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından numuneler meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile konvansiyonel yöntemle boyanmıştır. Boyama işlemi sonucunda numunelerin spektrofotometrik özellikleri ve boyama haslıkları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre metal tuzlarının oldukça düşük miktarlarda kullanımıyla meşe palamudundan elde edilen boyarmaddenin sentetik boyarmaddelerin yerine kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Çalışma kapsamında 150 g/m² ağırlığında iplik numarası 30/1 Ne olan 100% pamuk ipliğinden örülmüş süprem kumaş meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile boyanmıştır. Meşe palamudundan doğal boya elde etmek için 100 gram öğütülmüş meşe palamudu 1000 mL su içerisinde 60 dakika kaynatılmış ve boya ekstraktı süzülerek boyamaya hazır hale getirilmiştir. Ardından meşe palamudu doğal boya ekstraktı soğumaya bırakılmıştır. Boyarmaddelerin pamuk lifine bağlanmasını ve haslık özelliklerini artırmak için, kumaş numuneleri boyama işleminden önce kalay klorür (SnCl₂), demir III klorür (FeCl₃), potasyum alüminyum sülfat (KAl(SO₄)₂·12H₂O), potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür, ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit (C₆H₈O₆) kullanılmıştır.

2.2. Yöntem

Bu çalışma, %100 pamuk ipliğinden elde edilen pamuk örgü kumaş numunelerinin meşe palamudundan ekstrakte edilen doğal boya ile boyandığı ve sonucunda boyama özelliklerinin araştırıldığı deneysel bir araştırmadır. Araştırma kapsamında pamuk kumaş numunelerinin meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile boyama özellikleri ve boyama özelliklerine mordan madde çeşidinin etkisi incelenmiştir. Boyama işlemi konvansiyonel işleme göre yapılmış olup, boyama işleminden önce numunelere yine konvansiyonel yöntemle ön-mordanlama işlemi yapılmıştır.

2.3. Mordanlama

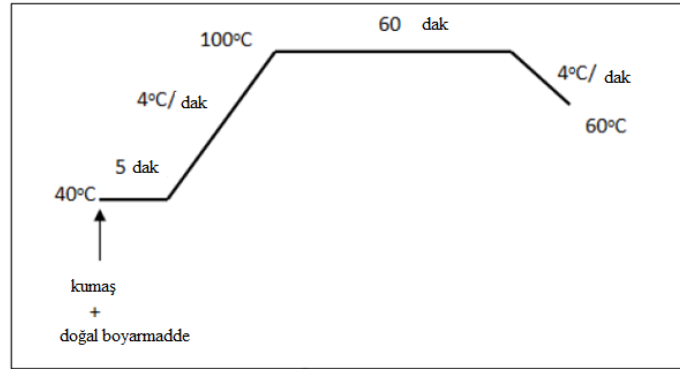
Çalışma kapsamında mordan maddesi olarak kalay klorür (SnCl_2), demir III klorür (FeCl_3), potasyum alüminyum sülfat ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür, ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) kullanılmıştır. Mordanlama işleminde 2 gram kumaş numunesi 1:40 flotte oranında, kaynama sıcaklığında 60 dk farklı mordan maddeleri ile muamele edilmiş, işlem sonunda fazla flotte uzaklaştırılarak numuneler durulanmıştır. Mordanlama işleminde kullanılan mordanlar ve konsantrasyonları Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 2. Mordanlama İşleminde Kullanılan Mordanlar ve Konsantrasyonları

Mordan Maddesi	Konsantrasyon (%)
Kalay klorür (SnCl_2)	3
Demir III klorür (FeCl_3)	3
Potasyum alüminyum sülfat ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)	3
Potasyum alüminyum sülfat + Demir III Klorür	1.5 +1.5
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür + Askorbik Asit ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)	1+1+1

2.4. Boyama İşlemi

Meşe palamudundan ekstrakte edilen doğal boyarmadde ile pamuk kumaş numuneleri 1:40 flotte oranında yüksek sıcaklıklı boyama makinesinde (HT boyama makinesi) 60 dk boyanmıştır. Boyama işleminde kullanılan doğal boyarmadde 100g/L’ lik stok doğal boyarmadde ekstraktından seyreltilmeden doğrudan kullanılmıştır. Boyama sonunda kumaş numuneleri boyama flottesinde 24 saat kendi halinde bekletilmiştir. Ardından numunelere 500 mL soğuk su ile taşar yıkama, 250 mL 60 °C sıcak su ile yıkama, 250 mL kaynar sabunlama ve son olarak da 500 mL soğuk su ile durulama yapıldıktan sonra numuneler sıkılmış ve kendi halinde kurutulmuştur. Boyama sırasında gerçekleşen sıcaklık-zaman diyagramı Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Boyama İşleminin Sıcaklık-Zaman Diyagramı

2.5. Kolorimetrik Ölçümler

Boyanmış numunelerin % reflektans değerleri Macbeth 2180 UV Renk Ölçüm Cihazı ile CIELab sistemine göre ölçülmüştür. Numunelerin renk ölçümleri CIEL*a*b* sistemine uygun olarak 10° gözlemci ile D65 gün ışığı standardına göre değerlendirilmiş ve toplam renk farklılığı Formül 1’ e göre hesaplanmıştır. Bu sistemde yer alan L* parlaklık, a* kırmızılık-yeşillik ve b* sarılık-mavilik anlamına gelmektedir. Ayrıca boyamaların renk kuvveti (K/S) Kubelka-Munk eşitliği

(Formül 2) kullanılarak hesaplanmıştır (Xin 2006). Boyamaların renk ölçümlerinde mordanlamadan boyanmış numuneler standart olarak kabul edilmiştir. Kubelka-Munk eşitliğinde yer alan R, K ve S sırasıyla maksimum absorpsiyondaki dalga boyunda lifin reflektans değerini, absorpsiyon katsayısı ve saçınım katsayısını ifade etmektedir (Xin 2006).

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

$$K/S = (1-R)^2/2R \quad (2)$$

2.6. Haslık Ölçümleri

Bu çalışmada, numunelerin yıkama haslık testleri ISO 105-C06 standardına göre (ISO 105-C06: 2010) Gyrowash Washer Tester yıkama test cihazında yapılmış ve yıkama haslık sonuçları gri skala ile değerlendirilmiştir. Numunelerin sürtme haslıkları ise ISO 105-X12 standardına uygun olarak (ISO 105-X12: 2016) Crockmeter Test cihazında gerçekleştirilmiştir ve sonuçlar gri skala ile değerlendirilmiştir. Numunelerin ışık haslık testleri ise EN ISO 105-B02 standardına göre (EN ISO 105-B02:1994) James H. Heal ışık haslığı test cihazında yapılmış ve sonuçlar mavi skala referansı ile değerlendirilmiştir.

Haslık, boyanmış numunelerin dış etkenlere karşı gösterdiği dirençtir. Yıkama, sürtme ve ışık haslığı bazı haslık çeşitleridir. Yıkama ve sürtme haslığı 1-5 arasında değerlendirilirken, ışık haslığı 1-8 arasında değerlendirilir. Yıkama ve sürtme haslığında 1; kötü, 2; zayıf, 3; orta, 4; iyi, 5; çok iyi anlamına gelmektedir. Işık haslığında ise 1 ve 2; kötü, 3; zayıf, 4; orta, 5; ortanın üzeri, 6 ve 7; iyi, 8; çok iyi anlamına gelmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kolorimetrik Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada konvansiyonel yönteme göre meşe palamudundan ekstrakte edilen doğal boya ile boyanmış kumaş numunelerinin spektrofotometrik ölçüm sonucunda elde edilen renk farklılığı değerleri Tablo 3' de verilmiştir. Renk farklılığı ölçümlerinin hesaplanmasında ön-mordanlama işlemine tabi tutulmamış numune referans kabul edilmiştir.







Tablo 3. Numunelerin Spektrofotometrik Ölçüm Sonuçlarına Göre Hesaplanan Renk Farklılığı Değerleri

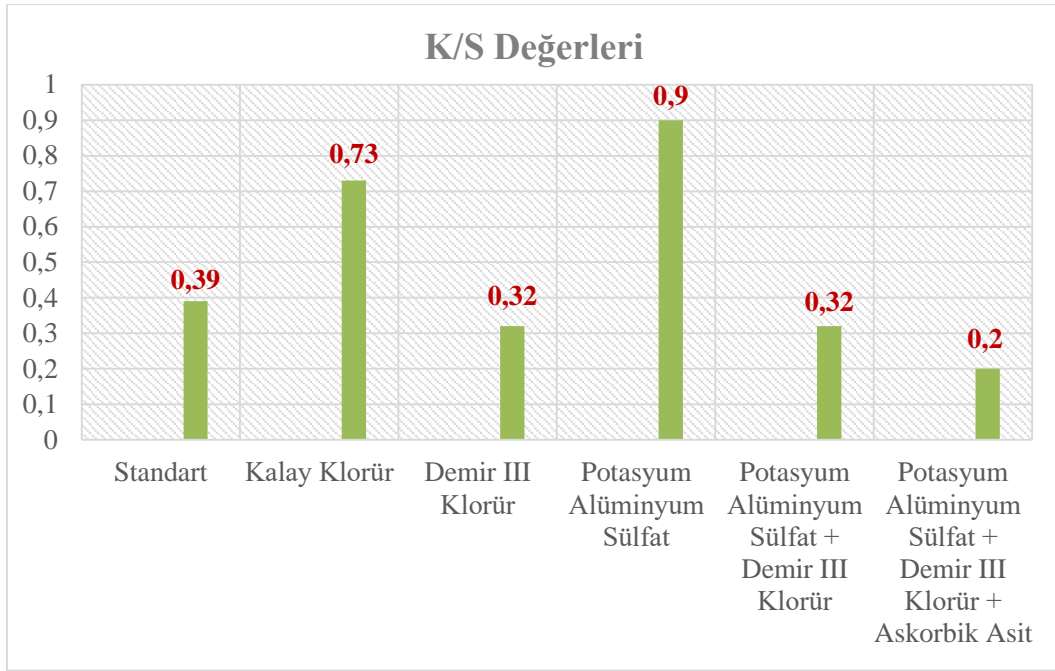
Mordan Cinsi	ΔE^*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*
Kalay Klorür	3.319	3.221	0.766	0.238	0.357
Demir III Klorür	17.017	-14.091	1.005	-9.487	-9.046
Potasyum Alüminyum Sülfat	0.754	-0.020	-0.610	0.443	0.360
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür	12.861	-8.130	-0.739	-9.938	-9.922
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür + Askorbik Asit	5.482	0.212	-0.079	-5.478	-5.418

Kolorimetrik ölçümler sonucunda hesaplanan ΔE^* değeri standart numuneye göre toplam renk farklılığını ifade etmektedir. $\Delta E^* > 1$ ise ölçüm yapılan numune ile standart numune arasındaki toplam renk farkı fazla, $\Delta E^* < 1$ ise standart numune ve ölçüm yapılan numune arasındaki renk farkı azdır. Tablo 3 incelendiğinde, farklı mordan maddeleri kullanılarak ön-mordanlama işlemi

yapılan ve ardından boyanan numuneler ile standart numune arasındaki renk farkı fazladır. Mordanlanmış numuneler ile standart numune arasındaki renk farkının fazla olmasının nedeni, mordan madde olarak kullanılan metal tuzların numunelere bağlanarak, numunelerdeki bağ enerjisini değiştirdiği düşünülmektedir. Bağ enerjilerinde meydana gelen değişikliklerden dolayı, numunelerin yansıttığı ve absorpladığı ışık miktarı varyasyon göstermektedir (McDonald 1997, Eyüpoğlu 2020). CIEL*a*b* ölçümleri sonucunda hesaplanan ΔL^* değerlerinin (+) olması, numunenin standart numuneye göre daha açık renkte olması, (-) olması ise numunenin standart numuneye göre daha koyu renkte olması anlamına gelmektedir. Tablo 3' deki sonuçlara göre kalay klorür ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ile mordanlanmış numuneler standart numuneden daha açık, demir III klorür, potasyum alüminyum sülfat ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür ile mordanlanmış numuneler standart numuneden daha koyu renktedir. Kullanılan mordan çeşidindeki farklılığın numunelerin bağ enerjisinde değişikliğe neden olması ve sonuç olarak farklı miktarlarda ışık absorplama ve yansıtmaları sonucunda renk koyulukları arasında farklılık gözlemlendiği düşünülmektedir. Renk farklılıklarındaki Δa^* değeri kırmızılık-yeşillik arasındaki farktır ve Δa^* değerinin pozitif olması kırmızı nüansın fazla olduğu, negatif olması yeşil nüansın fazla olduğu anlamına gelmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre kalay klorür ve demir III klorür ile mordanlanmış numunelerin standart numuneden daha kırmızı; potasyum alüminyum sülfat, potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ile mordanlanmış numunelerin renkleri standart numuneye göre daha yeşildir. Spektrofotometrik ölçümler sonucunda hesaplanan Δb^* değeri mavi-sarı eksenini ifade etmekte olup, bu değer pozitif olması sarı nüansın baskın olması, negatif olması ise mavi nüansın baskın olması anlamına gelmektedir. Hesaplamalara göre kalay klorür ve potasyum alüminyum sülfat ile mordanlanmış numuneler daha sarı; demir III klorür, potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ile mordanlanmış numunelerde mavi nüans baskındır. Son olarak Δc^* değerinin (+) olması ise yüksek kromayı yani doygunluğu ifade eder. Mordan cinsine göre boyamaların doygunluk değerinde değişiklikler görülmüştür. Kalay klorür ve potasyum alüminyum sülfat ile mordanlanmış numunelerin doygunluğunun yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca numunelerin RGB değerleri ve renkleri Tablo 4' de verilmiştir.

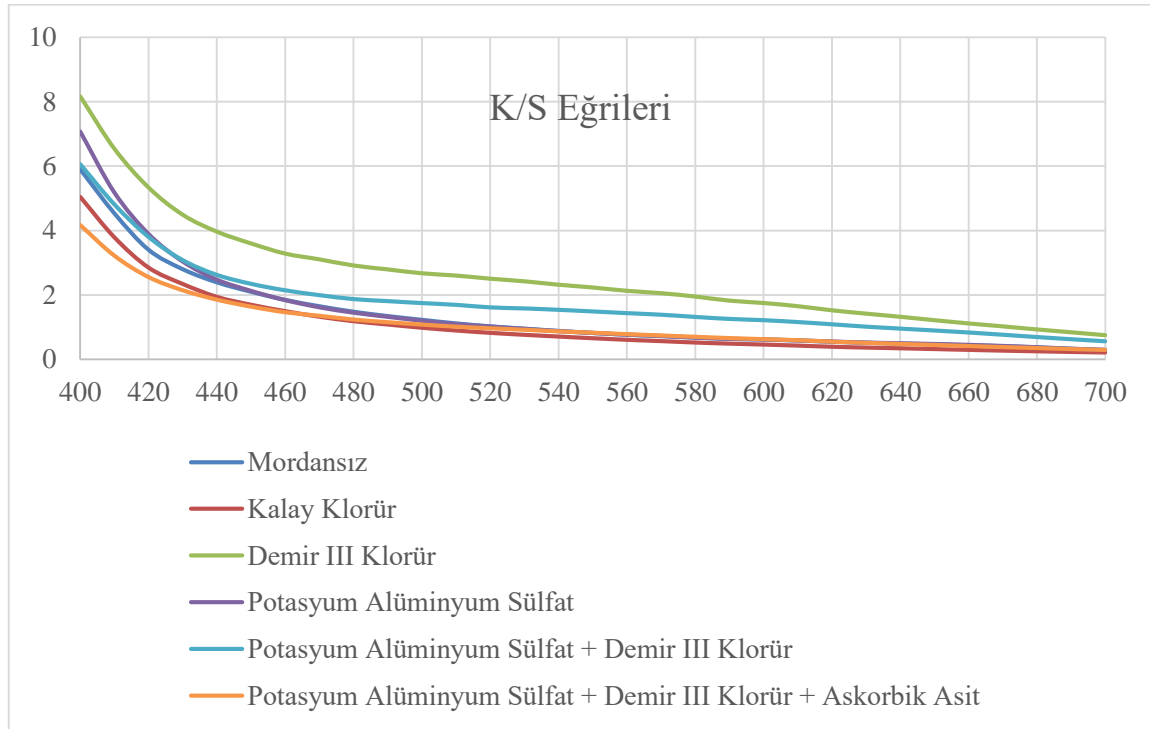
Tablo 4. Numunelerin RGB Değerleri ve Renkleri

Numune	R	G	B	Renk
Standart	168	145	106	
Kalay Klorür	178	153	114	
Demir III Klorür	127	109	88	
Potasyum Alüminyum Sülfat	167	145	105	
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür	140	125	104	
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür + Askorbik Asit	166	145	117	



Şekil 2. Numunelerin renk koyuluk değerleri

Şekil 2 boyanmış numunelerin 400 nm dalga boyundaki renk koyuluk (K/S) değerlerini göstermektedir. Numunelerin renk koyuluk değerleri standart numune ile karşılaştırıldığında, kalay klorür ve potasyum alüminyum sülfatla mordanlanmış numunelerin renk koyulukları daha yüksek iken, demir III klorür, potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ile mordanlanmış numunelerin renk koyuluk değerleri standart numuneden daha düşüktür.



Şekil 3. Numunelerin 400-700 nm dalga boyunda K/S eğrileri

Numunelerin 400-700 nm dalga boyundaki renk koyuluk eğrileri (K/S) Şekil 3' de verilmiştir. Farklı metalik tuzlarla ön-mordanlama sonucunda numunelerin bağ enerjileri farklılık göstereceği için, numunelerin üzerlerine gelen ışığı absorplama ve yansıtma miktarlarının değiştiği düşünülmektedir.

3.2. Haslık Ölçüm Sonuçları

Pamuk kumaş numunelerinin meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile boyanması sonucunda elde edilen yıkama, sürtme ve ışık haslığı değerleri Tablo 5'de verilmektedir.

Tablo 5. Meşe Palamudundan Elde Edilen Doğal Boyarmadde ile Boyanmış Numunelerin Haslık Değerleri

Numune	Yıkama Haslığı							Sürtme Haslığı		Işık Haslığı
	Renk Değişimi	Lekeleme						Kuru	Yaş	
		CA	CO	PA	PET	PAN	WO			
Standart	2-3	4	4	4-5	4-5	4	4	3	3-4	6
Kalay Klorür	2-3	4	3-4	3-4	4	4-5	3-4	3-4	3-4	6
Demir III Klorür	3	4	3-4	4	4	4	3-4	3	3-4	6
Potasyum Alüminyum Sülfat	3	4	3	3-4	4	4-5	4	3-4	3-4	6
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür	3	4-5	3-4	4	4	4	4	3	3-4	6
Potasyum Alüminyum Sülfat + Demir III Klorür + Askorbik Asit	3	4	3-4	4	4	4-5	4	3	3-4	6

*CA: Selüloz asetat, CO: Pamuk, PA: Poliamid, PET: Polyester, PAN: Akrilik, WO: Yün

Tablo 5 incelendiğinde numunelerin haslık değerlerinin genel olarak yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Doğal boyarmaddelerle pamuklu numunelerin boyanmasında mordan maddesi olarak kullanılan geçiş elementlerinin tuzları hem renk nüanslarını artırmakta hem de boyarmaddeyi liflerin oksokrom (bağlayıcı) gruplarına kuvvetli kimyasal bağlarla bağlamaktadır (Adem ve Subasar 2012). Numunelerin yıkama, sürtme ve ışık haslıkları mordan cinsi açısından incelendiğinde, numunelerin haslık değerleri üzerine kullanılan mordan madde cinsinin çok fazla etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan mordan maddeler metal tuzlarıdır. Kullanılan bu metal tuzlarının boyarmaddelerle lif arasında yaklaşık oranlarda bağ kurdurduğu düşünülmekte, bu yüzden haslık değerleri arasında dikkate değer bir varyasyonun olmadığı sonucuna varılmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada pamuk örme kumaştan elde edilen numuneler meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile konvansiyonel yöntemle boyanmıştır. Boyama işleminden önce numuneler kalay klorür (SnCl_2), demir III klorür (FeCl_3), potasyum alüminyum sülfat ($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür, ve potasyum alüminyum sülfat + demir III klorür + askorbik asit ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) ile mordanlanmıştır. Meşe palamudundan elde edilen doğal boyarmadde ile pamuk kumaşın boyama özelliklerine mordan çeşidinin etkisi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mordan cinsi numunelerin renk özelliklerine etki etmektedir. Numunelerin yıkama, sürtme ve ışık haslıklarına mordan cinsinin etkisi incelendiğinde, numunelerin haslık değerleri

üzerine kullanılan mordan madde cinsinin çok fazla etkili olmadığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen boyama ve haslık değerleri sonucuna göre meşe palamudundan ekstrakte edilen doğal boyarmaddenin, pamuk lifinden elde edilen kumaşların boyanmasında sentetik boyalara alternatif olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, elde edilen bu doğal boyarmaddenin sürdürülebilir, ekolojik, biyolojik olarak çözülebilir olması ve insan sağlığına zararlı olmaması nedeniyle sentetik boyalara alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Makaleye değerli yorumları ile katkı sağlayan hakemlere teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Amutha, K., & Sudhapriya, N. (2020). Dyeing of textiles with natural dyes extracted from *Terminalia Arjuna* and *Thespesia Populnea* fruits. *Industrial Crops and Products*, 148, 112303.
- Eyüpoğlu, Ş. (2020). Yabani ekin çiçeği bitkisinden elde edilen doğal boya ile keten kumaşın boyama özelliklerinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 317-325.
- Haji, A. (2020). Natural dyeing of wool with henna and yarrow enhanced by plasma treatment and optimized with response surface methodology. *The Journal of the Textile Institute*, 111(4), 467-475.
- Hwang, E. K., Lee, Y. H., & Kim, H. D. (2008). Dyeing, fastness, and deodorizing properties of cotton, silk, and wool fabrics dyed with gardenia, coffee sludge, *Cassia tora*. L., and pomegranate extracts. *Fibers and Polymers*, 9(3), 334-340.
- Islam, M. T., Liman, M. L. R., Roy, M. N., Hossain, M. M., Repon, M. R., & Mamun, M. A. A. (2021). Cotton dyeing performance enhancing mechanism of mangiferin enriched bio-waste by transition metals chelation. *The Journal of The Textile Institute*, 1-13.
- Jabar, J. M., Adedayo, T. E., & Odusote, Y. A. (2021). Green, eco-friendly and sustainable alternative in dyeing cotton fabric using aqueous extract mucuna slonaei F dye: Effects of metal salts pre-mordanting on color strength and fastness properties. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 4, 100151.
- Kamel, M. M., El Zawahry, M. M., Ahmed, N. S. E., & Abdelghaffar, F. (2011). Ultrasonic dyeing of cationized cotton fabric with natural dye. Part 2: Cationization of cotton using quat 188. *Industrial Crops and Products*, 34(3), 1410-1417.

- Kandasamy, N., Kaliappan, K., & Palanisamy, T. (2021). Upcycling sawdust into colorant: ecofriendly natural dyeing of fabrics with ultrasound assisted dye extract of pterocarpus indicus willd. *Industrial Crops and Products*, 171, 113969.
- Liman, M. L. R., Islam, M. T., Repon, M. R., Hossain, M. M., & Sarker, P. (2021). Comparative dyeing behavior and UV protective characteristics of cotton fabric treated with polyphenols enriched banana and watermelon biowaste. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 21, 100417.
- Lohtander, T., Arola, S., & Laaksonen, P. (2020). Biomordanting willow bark dye on cellulosic materials. *Coloration Technology*, 136(1), 3-14.
- Mahfoudhi, A., Baaka, N., Haddar, W., Mhenni, M. F., & Mighri, Z. (2015). Development and optimization of the extraction process of natural dye from Tamarix aphylla (L.) Karst. Leaves using response surface methodology (RSM). *Fibers and Polymers*, 16(7), 1487-1496.
- Mansour, R., Ezzili, B., & Farouk, M. (2017). The use of response surface method to optimize the extraction of natural dye from winery waste in textile dyeing. *The Journal of The Textile Institute*, 108(4), 528-537.
- McDonald R., (1997). Colour physics for industry (2. baskı). *Society of Dyers and Colourists*, Bredford, England.
- Önal, A. & Subasar, F. D. (2012). Kırmızı lahanadan (Brassica Oleracea var. Capitata f. Rubra) elde edilen doğal boya ile yün, pamuk ve keten kumaşların boyanması. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 1, 35-41.
- Phan, K., Van Den Broeck, E., Van Speybroeck, V., De Clerck, K., Raes, K., & De Meester, S. (2020). The potential of anthocyanins from blueberries as a natural dye for cotton: A combined experimental and theoretical study. *Dyes and Pigments*, 176, 108180.
- Prabhu, K. H., Teli, M. D., & Waghmare, N. G. (2011). Eco-friendly dyeing using natural mordant extracted from emblica officinalis G. fruit on cotton and silk fabrics with antibacterial activity. *Fibers and Polymers*, 12(6), 753-759.
- Shahmoradi Ghaheh, F., Moghaddam, M. K., & Tehrani, M. (2021). Comparison of the effect of metal mordants and bio-mordants on the colorimetric and antibacterial properties of natural dyes on cotton fabric. *Coloration Technology*, 137(6), 689-698.
- Test for colour fastness of textiles-colour fastness to washing, International Organization for Standardization ISO 105-C06, 1997.
- Textiles-Tests for colour fastness Part X12: Colour fastness to rubbing, Türk Standartlar Enstitüsü TS 717 EN ISO 105- X12, 2000.
- Textiles-tests for colour fastness-Part B02: Colour fastness to artificial light: Xenon arc fading test, Türk Standartlar Enstitüsü TS 1008 EN ISO 105-B02, 2001.
- Vankar, P. S., & Shukla, D. (2011). Natural dyeing with anthocyanins from Hibiscus rosa sinensis flowers. *Journal of Applied Polymer Science*. 122(5), 3361-3368.
- Xin, H.J, ed. (2006), Total colour management in textiles, *Woodhead Publishing Limited*, Elsevier.

- Yusuf, M., Khan, S. A., Shabbir, M., & Mohammad, F. (2017). Developing a shade range on wool by madder (*Rubia cordifolia*) root extract with gallnut (*Quercus infectoria*) as biomordant. *Journal of Natural Fibers*, 14(4), 597-607.
- Zhang, Y., Islam, S. U., Rather, L. J., & Li, Q. (2022). Recent advances in the surface modification strategies to improve functional finishing of cotton with natural colourants-a review. *Journal of Cleaner Production*, 130313.



Araştırma Makalesi / Research Article

**ŞANS KISITLI VERİ ZARFLAMA ANALİZİ İLE ETKİNLİK ÖLÇÜMÜ:
HAVALİMANI ÖRNEĞİ***

**EFFICIENCY MEASUREMENT WITH CHANCE CONSTRAINED DATA ENVELOPMENT
ANALYSIS: AIRPORT EXAMPLE**

Elif DERE¹

Berk AYVAZ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1109496>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
elif.demirdere@hotmail.com

Geliş Tarihi / Received
27.04.2022

Kabul Tarihi / Accepted
04.08.2022

Öz

Günümüzde sürekli gelişen teknoloji ve ekonomi şirketlerin işleyişini etkilemektedir. Havayolu ulaşımının en çok tercih edilen ulaşım aracı olmasından dolayı havacılık sektörü de hızla değişim ve gelişim göstermektedir. Türkiye’de ulaşım aracı olarak her geçen gün daha fazla kullanılan hava taşımacılığı, verilen havalimanı hizmeti açısından da önem taşımaktadır. Ülkemizdeki havalimanlarının etkinlik ölçümlerinin yapılması, buldukları sektördeki seviyelerini ve yapılması gereken iyileştirmeleri tespit etmekte fayda sağlamaktadır. Veri Zarflama Analizi ise etkinlik analizinde kullanılan önemli bir yöntemdir. Deterministik yapıda ölçüm yapılabildiği gibi şans kısıtlı Veri Zarflama Analizi ile de stokastik yapıda etkinlik analizi yapılabilmektedir. Bu çalışmada Türkiye’de hizmet veren 42 havalimanının 2020 yılı verileri kullanılarak deterministik ve şans kısıtlı Veri Zarflama Analizi ile etkinlik analizleri yapılmıştır. Analiz sonucunda “etkin” olan havalimanları belirlenmiş, etkin olmayan havalimanları için referans kümesi oluşturularak potansiyel iyileştirme hesaplamaları yapılmış ve etkinlik sonucunda önerilerde bulunulmuştur. Uygulama ile Türkiye’deki havalimanlarının etkinlikleri değerlendirilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: BCC, CCR, havalimanı, şans kısıtlı veri zarflama analizi, veri zarflama analizi.

Abstract

Today, constantly developing technology and economy affect the functioning of companies. Since air transport is the most preferred means of transportation, the aviation sector also changes and develops rapidly. Air transportation, which is used more and more as a means of transportation in Turkey, is also important in terms of the airport service provided. It is useful to measure the efficiency of airports in our country, to determine their level in the sector and to determine the improvements that need to be made. Data Envelopment Analysis is an important method used in efficiency analysis. While measurement can be made in a deterministic structure, efficiency analysis can be performed in a stochastic structure with chance-limited Data Envelopment Analysis. In this study, efficiency analyzes were carried out with deterministic and chance-limited Data Envelopment Analysis, using the 2020 data of 42 airports serving in Turkey. As a result of the analysis, the “active” airports were determined, for the inactive airports, potential improvement calculations were made by creating a reference set and suggestions were made as a result of the activity. With the application, the efficiency of airports in Turkey can be evaluated.

Keywords: Airport, BCC, CCR, chance constrained data envelopment analysis, data envelopment analysis.

*Bu yayın Elif DERE isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. elif.demirdere@hotmail.com, Orcid.org/0000-0002-8054-6999.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. bayvaz@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8098-3611.

1. GİRİŞ

Havacılık sektörü tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de büyük ölçüde gelişmekte ve hızla büyümektedir. Teknolojideki yenilikler ve nüfus artışı gibi faktörler bu büyüme ve gelişmenin en büyük etkenleridir. Günümüzde özellikle turizm için havayolu en çok tercih edilen ulaşım araçlarından biridir. Havacılığın gelişimi ekonomiyi de bu doğrultuda oldukça etkilemektedir. Ülkeler arası kültür etkileşimiyle birlikte ekonomik olarak da ilişkiler kurulmasını sağlamaktadır. Ayrıca havayolu ulaşımı diğer ulaşım türlerinden daha fazla zaman kazandırmakta ve gün geçtikçe seyahat konfor seviyesi arttığından tercih edilme nedenleri artmaktadır (Yazgan, 2012).

İşletmeler, hedeflerine ulaşmak veya buldukları sektördeki konumlarını anlamak için işletme performanslarını değerlendirmek durumundadır. Özellikle yöneticilerin, işletmelerinin etkin olduklarını kontrol etmek ve etkin olabilmek için yapılması gerekenleri tespit edebilmek adına etkinlik ölçümü yapmaları gerekmektedir. Etkinlik ölçümü, sektördeki diğer işletmelere göre kaynakların daha verimli ve etkin kullanımı ile firmayı rekabet açısından öne geçirecektir. Aynı zamanda şirket verimliliğini de belirlemekte yardımcı rol oynamaktadır.

Etkinlik ölçümünde kullanılan birçok yöntem bulunmaktadır. Veri Zarflama Analizi (VZA) çok sayıda girdi ve çıktı altında etkinlik ölçümü yapan ve parametrik olmayan bir yöntemdir. Bu özelliği ile diğer ölçüm yöntemlerine göre daha avantajlıdır. VZA aynı girdi ve çıktı altında karar verme birimleri olarak adlandırılan birimlerin etkinliğini aynı girdi ve çıktı altında ölçmektedir. Parametrik olmayan bir yöntem olan VZA ile birçok konuda etkinlik analizi yapılabilmektedir. Yalnızca aynı sektördeki şirket etkinlikleri değil, belirli bir firmanın şubeleri, okullardaki derslikler vb. konular için de bu yöntem kullanılabilir. Klasik VZA deterministik yapıdadır. Ölçüm sırasında kullanılan tüm verilerin (girdi ve çıktıların) doğru ve tam olduğunu varsaymaktadır. Bu varsayım nedeniyle belirsizlik olan durumlarda, karar verme birimlerini etkisiz olarak kabul etmektedir. Şans Kısıtlı VZA yöntemi belirsizlik altında etkinlik ölçümü yaparak deterministik VZA yöntemine stokastik bir yaklaşım sağlamaktadır (Gedik, 2010).

Literatür incelendiğinde, VZA’nın etkinlik analizinde sıklıkla kullanılan bir yöntem olduğu ve bu konuda birçok çalışma yapıldığı görülmektedir:

Özden (2008) yaptığı çalışmada Türkiye’deki 24 vakıf üniversitesinin etkinliğini deterministik VZA yöntemiyle ölçmüştür. CCR modeli uygulamasında 15, BCC modelde ise 20 üniversitenin etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada, ortalama toplam etkinlik değeri 0,92 bulunarak Türkiye’deki vakıf üniversitelerinin genel olarak verimli çalıştıkları ortaya çıkmıştır.

Aydın & Borat (2021) Türkiye’de bitkisel üretim hasılası yüksek olan 20 ilin VZA ile etkinlik ölçümünü yapmıştır. Çalışmada girdi olarak; “İşlenen Tarım Alanı”, “Tarım Mekanizasyon”, “Tarımsal Sulamada Kullanılan Enerji” ve “Gübre Tüketimi”, çıktı olarak ise “Sebze Meyve Üretim” ve “Tahıl ve Diğer Bitkisel Üretim” kullanılmıştır. Çalışma sonucunda; CCR model uygulandığında 11 ilin, BCC model uygulandığında ise 10 adet ilin etkin olduğu gözlemlenmiştir.

Deterministik model çalışmalarıyla birlikte stokastik (şans kısıtlı) model için de yapılmış çalışmalar yer almaktadır:

Turgutlu ve ark. (2007) deterministik ve şans kısıtlı VZA modelleri ile Türk sigortacılık şirketlerinin 1990-2004 yılları için etkinlik analizlerini yapmışlardır. Daha sonra Spearman sıra korelasyonu ve Mann-Whitney-Wilcoxon testleri ile analiz sonuçlarının tutarlılığı ölçülmüştür. Demireli & Özdemir (2013) 13 Avrupa ülkesinin 2005-2011 yılları için etkinliklerini şans kısıtlı VZA ile hesaplamışlardır. Çalışmada ülkelerin etkinlikleri hem deterministik hem de stokastik modelde ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Literatürde VZA'nın havacılık sektöründe uygulandığı çalışmalar da bulunmaktadır:

Ulutaş (2006) yaptığı çalışmada Türkiye'deki 34 havalimanının 2000-2004 yılları için etkinliklerinin ölçmüştür. Çalışma sonucunda; Atatürk, Antalya, Kayseri ve Konya havalimanlarının ölçüm yapılan her yıl için etkin oldukları sonucuna varılmıştır.

Kıyıldı & Karaşahin (2006) girdi olarak; "Check-in Kontuar Sayısı", "X-Ray Sayısı", "Terminal Binası Yolcu Kullanım Alanı", "Otopark Araç Kapasitesi", "Havaalanı Pist Büyüklüğü", "Havaalanı Apron Büyüklüğü", "Havaalanı Apron Uçak Kapasitesi", "Havaalanı Taksirut Uçak Kapasitesi", "Terminal Binası" ve "Konveyör Sayısı", çıktı olarak "Uçak Sayısı" verilerini kullanarak Türkiye'deki 32 havalimanının etkinliğini ölçmüştür.

Peker & Baki (2009) havalimanlarını yolcu sayılarına göre gruplandırarak (büyük ve küçük havalimanı olarak) her grup için etkinlik analizi yapmıştır. Çalışmada "Otopark Kapasitesi", "Pist Sayısı", "Havalimanı Büyüklüğü" ve "Personel Sayısı" girdi olarak, "Yolcu Sayısı" ve "Kargo Değeri" çıktı olarak kullanılmıştır. Analiz sonucunda büyük havalimanı grubundan Ankara, Antalya, Adana, Kayseri, Trabzon havalimanı, küçük havalimanı grubundan ise Malatya ve Çardak havalimanı etkin olarak ölçülmüştür.

Ömürbek ve ark. (2013) Türkiye'de faaliyet gösteren 40 havalimanının 2007, 2008, 2009 ve 2010 yılları için etkinliklerini deterministik VZA yöntemi ile ölçmüştür. Çalışmada havalimanları uçuş ve yolcu trafiğine göre sınıflandırılarak analiz edilmiştir. Büyük havalimanlarından Atatürk ve Antalya; orta büyüklükteki havalimanlarından Samsun Çarşamba, Kayseri, Van Ferit Melen ve Malatya; küçük havalimanlarından ise Balıkesir Körfez, Adıyaman, Sinop ve Amasya Merzifon havalimanları etkin olarak belirlenmiştir.

Avcı & Aktaş (2015) çalışmalarında 2013 ve 2014 verilerini kullanarak Türkiye'deki havalimanlarının yaz ve kış dönemleri için etkinlik analizini yapmışlardır. Çalışmada, "Personel Sayısı" ve "Terminal Alanı" girdi olarak; "Yolcu Sayısı", "Yük Trafiği" ve "Uçak Trafiği" ise çıktı olarak kullanılmıştır. Analiz sonucunda Atatürk havalimanının her iki dönemde de en yüksek etkinliğe sahip olduğu görülmüştür.

Yazgan & Karkacier (2015) Türkiye'de yer alan 37 havalimanının 2008-2011 yılları arasındaki etkinlik analizlerini deterministik VZA yöntemi ile yapmıştır. Çalışmada ayrıca Tobit model de uygulanmıştır. Sonuçta ise İstanbul Atatürk, Antalya, Muğla Milas Bodrum, Adana ve Tekirdağ Çorlu havalimanlarının uygulanan her yıl için etkin oldukları tespit edilmiştir.

VZA ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında, Türkiye'deki havalimanlarının etkinlik analizleri deterministik model kullanılarak yapılmış; ancak stokastik model kullanılmamıştır. Bu çalışmada ise, Türkiye'de faaliyet gösteren ve Devlet Hava Meydanları Genel Müdürlüğü'ne bağlı 42 havalimanının 2020 yılı verileri kullanılarak;

- Deterministik ve şans kısıtlı VZA modelleri ile etkinlik analizi yapılmış,
- Deterministik ve stokastik model sonuçları karşılaştırılmış,
- Etkin karar verme birimleri belirlenmiş,
- Etkin olmayan birimler için potansiyel iyileştirme oranları hesaplanmıştır.

Analizde kullanılan girdiler: Çalışan sayısı, işletme gideri, terminal alanı, pist sayısı ve apron sayısıdır. Çıktılar ise uçak trafiği, yolcu trafiği, yük trafiği ve işletme gelirdir.

Çalışmanın ikinci bölümünde veri zarflama konusu anlatılmış, üçüncü bölümde uygulama, dördüncü bölümde bulgular ve sonuç kısmında ise çalışma sonuçları değerlendirilmiştir. Kullanılan veriler ve ölçüm sonuç değerleri bulgular altında listelenmiştir.

Çalışmanın amacı, ülkemizdeki havalimanlarının etkinliğini ölçerek yapılması gereken iyileştirmelerin belirlenmesidir. Bununla birlikte diğer amaç ise, bu çalışma bulguları ile havalimanlarının daha iyi hizmet sunabilmesi için katkıda bulunmaktır.

2. VERİ ZARFLAMA ANALİZİ

Veri Zarflama Analizi, karar verme birimlerinin göreceli etkinliklerini birbirini referans alarak (karşılaştırma yaparak), aynı girdi ve çıktı altında ölçen doğrusal programlama tabanlı bir yöntemdir (Özbek, 2017).

1957 yılında Farrell “The Measurement of Productive Efficiency” isimli çalışmasını yayınlamıştır. Charnes, Cooper ve Rhodes bu çalışmadan yola çıkarak 1978 yılında ilk VZA çalışmasını ortaya çıkarmışlardır. Çalışmada veri zarflama analizi, üretilen mal ya da verilen hizmet ile benzer karar verme birimlerinin göreceli etkinliklerini ölçmeyi sağlayan ve parametrik olmayan bir etkinlik ölçüm modeli olarak tanımlanmıştır (Cook & Seiford, 2009).

VZA'nın diğer yöntemlerden en önemli farkı, çok sayıda girdi ve çıktı kullanılarak etkinlik ölçümü yapabilmesidir. Ölçüm sonucunda karar verme birimlerinin hangi değerlerini değiştirmek (arttırmak veya azaltmak) gerektiği, ne kadar değiştirmek gerektiği anlaşılabilir (Akgöbek ve ark., 2015).

VZA'nın genel özellikleri şu şekilde özetlenebilir (Ulutaş, 2006):

- Çok sayıda girdi ve çıktı kullanılabilir.
- Girdi ve çıktı değerleri aynı birimde olmak zorunda değildir.
- Karar verme birimleri birbirine referans alınarak değerlendirilir.

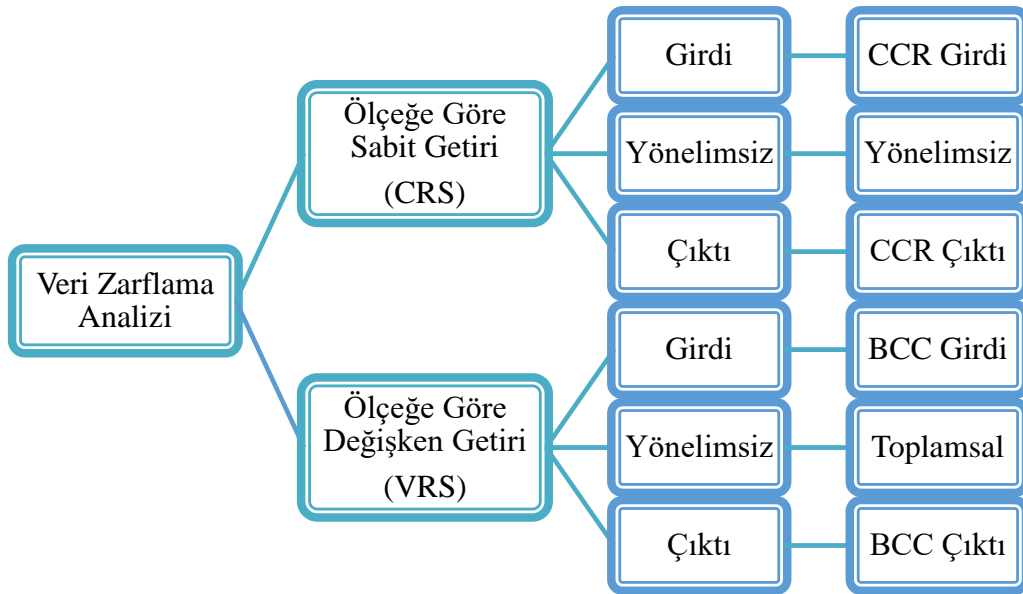
2.1. Deterministik Veri Zarflama Analizi

VZA modelleri zarflama şekillerine göre ayrılır (Topçuoğlu, 2016):

- Ölçeğe göre sabit getiri: Girdilerin miktarı arttırıldığında, çıktıların artma oranı aynı ise ölçeğe göre sabit getiri modelidir.
- Ölçeğe göre değişken getiri: Girdilerin miktarı arttırıldığında, çıktıların artma oranı farklı gözlemleniyorsa ölçeğe göre değişken getiri modelidir.

Girdi ve çıktı yönelimine göre ise; çıktılar sabit tutularak girdilerin ne kadar azaltılması gerektiği miktar hesaplanmak istenirse girdi odaklı, girdiler sabit tutularak çıktıların arttırılması gerektiği miktar hesaplanmak istenirse çıktı odaklı yönelim kullanılabilir (İleri, 1997).

VZA modelleri ölçeğe ve yönlendirmelere göre ayrılmaktadır. Bu modeller aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.



Şekil 1. Ölçeğe ve Yönlendirmelere Göre Veri Zarflama Analizi Modelleri (Yeşilyurt, 2003)

2.1.1. Charnes – Cooper – Rhodes (CCR) modeli

Charnes – Cooper – Rhodes modeli, karar verme birimlerinin toplam etkinliğini ölçmek için girdi odaklı ve çıktı odaklı yönelimler ile kullanılan modeldir (Kocakalay & Işık, 2003). Her model kendi içinde primal ve dual olarak ikiye ayırılır. Dual model sonuca daha hızlı ulaştıran bir model olarak primal modelden türetilmiştir.

2.1.1.1. Girdi odaklı CCR modeli

Girdi odaklı CCR Modeli, çıktı değerleri sabit tutulurken karar verme birimlerinin girdi miktarlarını ne kadar azaltması gerektiğini inceleyen modeldir (Oruç, 2008).

Primal Model	Dual Model
$Maks \left(\sum_{r=1}^s u_r y_{ro} \right)$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{r=1}^m v_i x_{io} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$ $u_r \geq 0; \quad v_i \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, s$	$Min \theta$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - \theta x_{io} \leq 0$ $\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - y_{ro} \geq 0$ $\lambda_j \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, s$

Şekil 2. Girdi Yönlü CCR Modelinin Primal ve Dual Form Formülasyonları

Burada,

n : KVB sayısı

s : Çıktı sayısı

m : Girdi sayısı
 u_r : o. KVB tarafından r. çıktıya verilen ağırlık değeri
 v_i : o. KVB tarafından i. girdiye verilen ağırlık değeri
 λ_j : j. KVB'ye ait ağırlık değeri
 x_{io} : o. KVB'nin kullandığı i. girdi miktarı
 y_{ro} : o. KVB'nin elde ettiği r. çıktı miktarı
 x_{ij} : j. KVB'nin kullandığı i. girdi miktarı
 y_{rj} : j. KVB'nin elde ettiği r. çıktı miktarı
 olarak ifade edilmektedir.

Karar verme biriminin etkinliği amaç fonksiyonuna bağlıdır. θ^* etkinlik skoru olmak üzere;
 $\theta^* < 1$ ise, karar verme birimi etkin değildir.
 $\theta^* = 1$ ise, karar verme birimi etkindir.

2.1.1.2. Çıktı odaklı CCR modeli

Çıktı odaklı CCR Modeli, karar verme birimlerinin girdi değerleri sabit tutulurken çıktılarını inceleyen modeldir.

Primal Model	Dual Model
$\text{Min} \sum_{i=1}^m v_i x_{io}$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{r=1}^s u_r y_{ro} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$ <p> $u_r \geq 0; v_i \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$ </p>	$\text{Maks } \Phi$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - x_{io} \leq 0$ $\sum_{r=1}^s \lambda_j y_{rj} - \Phi y_{ro} \geq 0$ <p> $\lambda_j \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$ </p>

Şekil 3. Çıktı Yönlü CCR Modelinin Primal ve Dual Form Formülasyonları

θ^* etkinlik skoru olmak üzere;
 $\theta^* > 1$ ise, karar verme birimi etkin değildir.
 $\theta^* = 1$ ise, karar verme birimi etkindir.

2.1.2. Banker – Charnes – Cooper (BCC) modeli

BCC Modeli karar verme birimlerinin teknik etkinliği ölçmeye yarayan bir Veri Zarflama Analizi modelidir (Behdioğlu & Özcan, 2009). CCR modelinden farklı olarak, kısıtlara toplam ağırlık değerlerinin 1'e eşit olduğu konvekslik kısıtı eklenmektedir (Kurşun, 2016).

Girdi odaklı BCC modeli

Primal Model	Dual Model
$\text{Maks} \left(\sum_{r=1}^s u_r y_{ro} - u_o \right)$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{r=1}^m v_i x_{io} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0$ <p>$u_r \geq 0; v_i \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$</p>	$\text{Min } \theta$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{j=1}^n x_{ij} \lambda_j - \theta x_{io} \leq 0$ $\sum_{j=1}^n y_{rj} \lambda_j - y_{ro} \geq 0$ $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ <p>$\lambda_j \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$</p>

Şekil 4. Girdi yönlü BCC Modelinin Primal ve Dual Form Formülasyonları

θ^* etkinlik skoru olmak üzere;

$\theta^* < 1$ ise, karar verme birimi etkin değildir.

$\theta^* = 1$ ise, karar verme birimi etkindir.

Çıktı odaklı BCC modeli

Primal Model	Dual Model
$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^m v_i x_{io} - v_o \right)$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{r=1}^s u_r y_{ro} = 1$ $\sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - v_o \leq 0$ <p>$u_r \geq 0; v_i \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$</p>	$\text{Maks } \Phi$ <p>Kısıtlar,</p> $\sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} - x_{io} \leq 0$ $\sum_{r=1}^s \lambda_j y_{rj} - \Phi y_{ro} \geq 0$ $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ <p>$\lambda_j \geq 0;$ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; r = 1, \dots, s$</p>

Şekil 5. Çıktı Yönlü BCC Modelinin Primal ve Dual Form Formülasyonları

θ^* etkinlik skoru olmak üzere;

$\theta^* > 1$ ise, karar verme birimi etkin değildir.

$\theta^* = 1$ ise, karar verme birimi etkindir.

2.2. Şans Kısıtlı Veri Zarflama Analizi

Veri Zarflama Analizi deterministik bir yapıda olduğundan, belirsiz durumlarda karar verme birimlerini etkisiz olarak değerlendirilir. Bu durum araştırmacıları yeni çalışmalara yönlendirmiştir. Şans kısıtının bulunması modeli deterministik yapıdan stokastik yapıya dönüştürmektedir (Gedik, 2010).

Deterministik Veri Zarflama Analizi'nde etkinlik değerleri, etkinlik sınırının yalnızca bir tarafında yer almaktadır; ancak Stokastik Veri Zarflama Analizi ile değerlerin sınır etrafında stokastik yapıda değişebilmelerine olanak tanınmaktadır (Land ve ark., 1993).

Şans Kısıtlı Veri Zarflama Analizi, 1993 yılında Land vd. tarafından CCDEA (Chance Constrained Data Envelopment Analysis) olarak ilkokullarda yapılan bir çalışma ile ortaya çıkarılmıştır.

Kısıtlar,	$\min \theta$ $Prob (Y^n \lambda \leq y_{no}) \leq 0.05$ $\theta x_{mo} \geq X^m \lambda$ $\lambda \geq 0$ $n = 1, \dots, N; \quad m = 1, \dots, M$
-----------	---

Şekil 6. Şans Kısıtlı Veri Zarflama Analizi Temel Formülasyonu

Burada,

$i, j = 1, \dots, I$: Etkinliği ölçülecek KVB'lerin kümesi

$m = 1, \dots, M$: VZA'da kullanılan girdi değişkenleri

$n = 1, \dots, N$: VZA'da kullanılan çıktı değişkenleri

$X = [x_{mi}]$: KVB'lere ilişkin girdi matrisi

$Y = [y_{ni}]$: KVB'lere ilişkin çıktı matrisi

X^m : X'in satır vektörü

Y^n : Y'nin satır vektörü

$X_o = [x_{mo}]$: İncelenen KVB'nin girdilerinin sütun vektörü

$Y_o = [y_{no}]$: İncelenen KVB'nin çıktılarının sütun vektörü

θ : Radyal girdi daralma (azalma) faktörü

(Etkinlik ölçüsü olarak kullanılacaktır.)

$\lambda = [\lambda_i]$: KVB yüklerinin sütun vektörü

olarak ifade edilmektedir.

Land ve ark. CCDEA modelinde, girdileri deterministik, çıktıları ise rassal olarak kabul ederek çıktı kısıtını "şans kısıtı" olarak adlandırmışlardır. Bununla birlikte karar verme birimlerinin yalnızca %5'i en iyi durumdan daha iyi bir performans gerçekleştireceği varsayıldığından olasılık değeri 0,05 olarak alınmıştır. Bu değer farklı düzeylerde de olabileceği gibi daha büyük değer verilmesi, etkin olmayan karar verme birimlerinin etkin olma düzeyine (1 değerine) yaklaşmalarını sağlamaktadır (Demireli & Özdemir, 2013).

1993 yılında Land vd., ilkokulların etkinlik ölçümünü yaptıkları çalışmada, CCDEA modelinin son halini aşağıdaki gibi belirtmişlerdir.

$$\begin{array}{l}
\text{Kısıtlar,} \\
\min \theta \\
Y^n \lambda - y_{no} - 1.645\sigma \geq 0, \\
\theta x_{mo} - X^m \lambda \geq 0 \\
n = 1, \dots, N; \quad m = 1, \dots, M; \quad \lambda \geq 0 \\
\sigma = c \left(\sum_i \lambda_i^2 - 2\lambda_o + 1 \right)^{0.5}
\end{array}$$

Şekil 7. Şans Kısıtlı Veri Zarflama Analizi Formülasyonu

Modelin düzenlendikten sonraki hali incelendiğinde; girdi odaklı CCR modelinin dual formuna standart normal dağılımın 0.05 anlamlılık düzeyindeki değeri olan 1.645 ve c sabit değeri eklenerek oluşturduğu görülmüştür. c sabit değeri, çıktıların düzey ortalamasının her karar verme birimi ile arasındaki standart sapmasıdır. Bununla birlikte c değeri, 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Değer 1'e doğru büyüdükçe çıktılar için izin verilen sınır dışı alanı artmaktadır. Çok fazla belirsiz veri durumunda CCDEA 1'e daha yakın sonuçlar vermektedir.

CCDEA modelinde θ^* etkinlik skoru olmak üzere;
 $\theta^* < 1$ ise, karar verme birimi etkin değildir.
 $\theta^* = 1$ ise, karar verme birimi etkindir.
 $\theta^* > 1$ ise, karar verme birimi hiper etkindir.

3. UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde Türkiye'de faaliyet gösteren 42 havalimanının 2020 yılına ait verileri kullanılarak; deterministik ve şans kısıtlı VZA modelleri ile etkinlikleri ölçülmüş ve karşılaştırma yapılmıştır.

3.1. Karar Birimlerinin Belirlenmesi

Veri Zarflama Analizi'nde anlamlı sonuçlar elde etmek için karar verme birimlerinin homojen olması, girdi ve çıktı kümesinin aynı olması gerekmektedir (Bowlin, 1998). Bununla birlikte karar birimi sayısı; m girdi ve n çıktı sayısı olmak üzere, en az "m+n+1" olmalıdır (Boussofianee ve ark., 1991). Çalışmada 42 havalimanı karar verme birimi olarak yer almaktadır.

3.2. Girdi ve Çıktı Değişkenlerinin Belirlenmesi

Girdi ve çıktı değişkenleri, sonuçların doğruluğu ve karar verme birimlerinin durumunu doğru ifade edebilmek açısından dikkatli seçilmelidir. Analizde optimal sonucu verebilecek girdi ve çıktıların belirlenmesi için literatürde yer alan benzer havacılık sektörü çalışmalarından yararlanılmıştır.

Gillen & Lall 1997 yılında VZA yöntemi ile Amerika'da havacılık sektöründe etkinlik analizi çalışması yapmıştır. Çalışmada "Pist Sayısı", "Giriş Sayısı", "Terminal Alanı", "Çalışan Sayısı", "Havaalanı Alanı", "Araba Park Alanı" ve "Bagaj Toplama Bantları" girdi olarak; "Yolcular", "Kargo", "İniş ve Kalkış" ve "Banliyö Hareketleri" ise çıktı olarak kullanılmıştır.

Sarkis (2000) tarafından yapılan çalışmada kullanılan girdiler: Pist sayısı, giriş sayısı, operasyon maliyetleri ve çalışan sayısıdır. Kullanılan çıktılar: Yolcular, kargo, iniş ve kalkış, operasyon gelirleri ve genel havacılık olarak belirtilmiştir.

Lin & Hong 2006 yılında çalışan sayısı, pist sayısı, park alanları, bagaj toplama bantları ve apron sayısını girdi olarak; yolcu sayısını, kargo, operasyon ve ticari gelirleri ise çıktı olarak kullanarak VZA ile etkinlik ölçümü yapmışlardır.

Yazgan (2012) Türkiye’deki 37 havalimanının etkinlik ölçümlerini yaparken girdi olarak; çalışan sayısı, işletme gideri, terminal alanı, pist sayısı ve apron sayısı, çıktı olarak yolcu trafiği, işletme geliri, uçak trafiği ve yük trafiğini kullanmıştır.

Literatür çalışmaları dikkate alınarak, çalışma için beş girdi ve dört çıktı değişkeni seçilmiştir.

Girdi Değişkenleri: Çalışan Sayısı (kişi), İşletme Gideri (bin TL), Terminal Alanı (m²), Pist Sayısı (adet), Apron Sayısı (adet) olarak seçilmiştir.

Çıktı Değişkenleri: Uçak Trafiği (adet), Yolcu Trafiği (kişi), Yük Trafiği (ton), İşletme Geliri (bin TL) kullanılmıştır.

3.3. Verilerin Elde Edilmesi

Tüm havalimanlarının kullanılan girdi ve çıktı değişkenlerine ait değerleri bulunamadığından, eksiksiz veri elde edilebilen 42 havalimanı ile etkinlik analizi yapılmıştır. Karar verme birimlerine ait girdi ve çıktı değişkenlerinin değerleri, Devlet Hava Meydanları İşletmesi (DHMI) Genel Müdürlüğü internet sitesinde (www.dhmi.gov.tr) yer alan 2020 yılı faaliyet raporundan elde edilmiştir.

3.4. Modellerin Uygulanması

Çalışmada dual formda deterministik VZA modellerinden; Girdi Odaklı CCR, Çıktı Odaklı CCR, Girdi Odaklı BCC ve Çıktı Odaklı BCC modelleri ile, şans kısıtlı VZA modeli uygulanmıştır. Uygulama öncesinde modellerin matematiksel formülasyonları oluşturulmuştur. Aşağıdaki formülasyonlar “Adana” karar birimi için yapılmıştır.

CCR girdi odaklı modelin matematiksel formülasyonu:

Amaç Fonksiyonu: $\min \theta$

$$\begin{aligned} \text{Girdi Kısıtı: } & 1*\lambda_1 + 1*\lambda_2 + 1*\lambda_3 + 2*\lambda_4 + 2*\lambda_5 + 3*\lambda_6 + 1*\lambda_7 + 1*\lambda_8 + 1*\lambda_9 + 2*\lambda_{10} + 1*\lambda_{11} + 1*\lambda_{12} \\ & + 2*\lambda_{13} + 1*\lambda_{14} + 1*\lambda_{15} + 2*\lambda_{16} + 1*\lambda_{17} + 1*\lambda_{18} + 1*\lambda_{19} + 1*\lambda_{20} + 1*\lambda_{21} + 2*\lambda_{22} + 1*\lambda_{23} + 1*\lambda_{24} + \\ & 2*\lambda_{25} + 1*\lambda_{26} + 1*\lambda_{27} + 1*\lambda_{28} + 2*\lambda_{29} + 2*\lambda_{30} + 2*\lambda_{31} + 1*\lambda_{32} + 1*\lambda_{33} + 1*\lambda_{34} + 1*\lambda_{35} + 1*\lambda_{36} + \\ & 1*\lambda_{37} + 1*\lambda_{38} + 1*\lambda_{39} + 1*\lambda_{40} + 1*\lambda_{41} + 1*\lambda_{42} \leq 1*\theta \end{aligned}$$

Her bir girdi için tekrar edilmiştir. Örnekte “Pist Sayısı” girdi değişkeni için formülasyon yazılmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Çıktı Kısıtı: } & 27539*\lambda_1 + 1246*\lambda_2 + 1727*\lambda_3 + 847*\lambda_4 + 50394*\lambda_5 + 71180*\lambda_6 + 15505*\lambda_7 + \\ & 2705*\lambda_8 + 1108*\lambda_9 + 11136*\lambda_{10} + 4682*\lambda_{11} + 5708*\lambda_{12} + 7945*\lambda_{13} + 6493*\lambda_{14} + 1918*\lambda_{15} + \\ & 4899*\lambda_{16} + 14583*\lambda_{17} + 1242*\lambda_{18} + 6233*\lambda_{19} + 1809*\lambda_{20} + 23161*\lambda_{21} + 46001*\lambda_{22} + 1877*\lambda_{23} \\ & + 11084*\lambda_{24} + 2858*\lambda_{25} + 736*\lambda_{26} + 9301*\lambda_{27} + 1503*\lambda_{28} + 4356*\lambda_{29} + 4181*\lambda_{30} + 18137*\lambda_{31} \\ & + 23900*\lambda_{32} + 2176*\lambda_{33} + 5005*\lambda_{34} + 11914*\lambda_{35} + 1193*\lambda_{36} + 2905*\lambda_{37} + 4389*\lambda_{38} + 3418*\lambda_{39} \\ & + 20820*\lambda_{40} + 14163*\lambda_{41} + 13368*\lambda_{42} \geq 27539 \end{aligned}$$

Tüm çıktı değişkenleri için tekrar edilmiştir. Örnekte “Uçak Trafikçi” değişkeni için formül yazılmıştır.

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}, \lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}, \lambda_{29}, \lambda_{30}, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}, \lambda_{40}, \lambda_{41}, \lambda_{42} \geq 0$$

CCR çıktı odaklı model matematiksel formülasyonu:

Amaç Fonksiyonu: maks ϕ

$$\text{Girdi Kısıtı: } 1*\lambda_1 + 1*\lambda_2 + 1*\lambda_3 + 2*\lambda_4 + 2*\lambda_5 + 3*\lambda_6 + 1*\lambda_7 + 1*\lambda_8 + 1*\lambda_9 + 2*\lambda_{10} + 1*\lambda_{11} + 1*\lambda_{12} + 2*\lambda_{13} + 1*\lambda_{14} + 1*\lambda_{15} + 2*\lambda_{16} + 1*\lambda_{17} + 1*\lambda_{18} + 1*\lambda_{19} + 1*\lambda_{20} + 1*\lambda_{21} + 2*\lambda_{22} + 1*\lambda_{23} + 1*\lambda_{24} + 2*\lambda_{25} + 1*\lambda_{26} + 1*\lambda_{27} + 1*\lambda_{28} + 2*\lambda_{29} + 2*\lambda_{30} + 2*\lambda_{31} + 1*\lambda_{32} + 1*\lambda_{33} + 1*\lambda_{34} + 1*\lambda_{35} + 1*\lambda_{36} + 1*\lambda_{37} + 1*\lambda_{38} + 1*\lambda_{39} + 1*\lambda_{40} + 1*\lambda_{41} + 1*\lambda_{42} \leq 1$$

Her bir girdi için tekrar edilmiştir. Örnekte “Pist Sayısı” girdi değişkeni için formülasyonu yazılmıştır.

$$\text{Çıktı Kısıtı: } 27539*\lambda_1 + 1246*\lambda_2 + 1727*\lambda_3 + 847*\lambda_4 + 50394*\lambda_5 + 71180*\lambda_6 + 15505*\lambda_7 + 2705*\lambda_8 + 1108*\lambda_9 + 11136*\lambda_{10} + 4682*\lambda_{11} + 5708*\lambda_{12} + 7945*\lambda_{13} + 6493*\lambda_{14} + 1918*\lambda_{15} + 4899*\lambda_{16} + 14583*\lambda_{17} + 1242*\lambda_{18} + 6233*\lambda_{19} + 1809*\lambda_{20} + 23161*\lambda_{21} + 46001*\lambda_{22} + 1877*\lambda_{23} + 11084*\lambda_{24} + 2858*\lambda_{25} + 736*\lambda_{26} + 9301*\lambda_{27} + 1503*\lambda_{28} + 4356*\lambda_{29} + 4181*\lambda_{30} + 18137*\lambda_{31} + 23900*\lambda_{32} + 2176*\lambda_{33} + 5005*\lambda_{34} + 11914*\lambda_{35} + 1193*\lambda_{36} + 2905*\lambda_{37} + 4389*\lambda_{38} + 3418*\lambda_{39} + 20820*\lambda_{40} + 14163*\lambda_{41} + 13368*\lambda_{42} \geq 27539*\phi$$

Tüm çıktı değişkenleri için tekrar edilmiştir. Örnekte “Uçak Trafikçi” değişkeni için formül yazılmıştır.

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}, \lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}, \lambda_{29}, \lambda_{30}, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}, \lambda_{40}, \lambda_{41}, \lambda_{42} \geq 0$$

BCC girdi odaklı model matematiksel formülasyonu:

Amaç Fonksiyonu: min θ

$$\text{Girdi Kısıtı: } 1*\lambda_1 + 1*\lambda_2 + 1*\lambda_3 + 2*\lambda_4 + 2*\lambda_5 + 3*\lambda_6 + 1*\lambda_7 + 1*\lambda_8 + 1*\lambda_9 + 2*\lambda_{10} + 1*\lambda_{11} + 1*\lambda_{12} + 2*\lambda_{13} + 1*\lambda_{14} + 1*\lambda_{15} + 2*\lambda_{16} + 1*\lambda_{17} + 1*\lambda_{18} + 1*\lambda_{19} + 1*\lambda_{20} + 1*\lambda_{21} + 2*\lambda_{22} + 1*\lambda_{23} + 1*\lambda_{24} + 2*\lambda_{25} + 1*\lambda_{26} + 1*\lambda_{27} + 1*\lambda_{28} + 2*\lambda_{29} + 2*\lambda_{30} + 2*\lambda_{31} + 1*\lambda_{32} + 1*\lambda_{33} + 1*\lambda_{34} + 1*\lambda_{35} + 1*\lambda_{36} + 1*\lambda_{37} + 1*\lambda_{38} + 1*\lambda_{39} + 1*\lambda_{40} + 1*\lambda_{41} + 1*\lambda_{42} \leq 1*\theta$$

Her bir girdi için tekrar edilmiştir. Örnekte “Pist Sayısı” girdi değişkeni için formülasyonu yazılmıştır.

$$\text{Çıktı Kısıtı: } 27539*\lambda_1 + 1246*\lambda_2 + 1727*\lambda_3 + 847*\lambda_4 + 50394*\lambda_5 + 71180*\lambda_6 + 15505*\lambda_7 + 2705*\lambda_8 + 1108*\lambda_9 + 11136*\lambda_{10} + 4682*\lambda_{11} + 5708*\lambda_{12} + 7945*\lambda_{13} + 6493*\lambda_{14} + 1918*\lambda_{15} + 4899*\lambda_{16} + 14583*\lambda_{17} + 1242*\lambda_{18} + 6233*\lambda_{19} + 1809*\lambda_{20} + 23161*\lambda_{21} + 46001*\lambda_{22} + 1877*\lambda_{23} + 11084*\lambda_{24} + 2858*\lambda_{25} + 736*\lambda_{26} + 9301*\lambda_{27} + 1503*\lambda_{28} + 4356*\lambda_{29} + 4181*\lambda_{30} + 18137*\lambda_{31} + 23900*\lambda_{32} + 2176*\lambda_{33} + 5005*\lambda_{34} + 11914*\lambda_{35} + 1193*\lambda_{36} + 2905*\lambda_{37} + 4389*\lambda_{38} + 3418*\lambda_{39} + 20820*\lambda_{40} + 14163*\lambda_{41} + 13368*\lambda_{42} \geq 27539$$

Tüm çıktı değişkenleri için tekrar edilmiştir. Örnekte “Uçak Trafikçi” değişkeni için formül yazılmıştır.

$$\text{Ağırlık Kısıtı: } \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{16} + \lambda_{17} + \lambda_{18} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{26} + \lambda_{27} + \lambda_{28} + \lambda_{29} + \lambda_{30} + \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + \lambda_{35} + \lambda_{36} + \lambda_{37} + \lambda_{38} + \lambda_{39} + \lambda_{40} + \lambda_{41} + \lambda_{42} = 1$$

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}, \lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}, \lambda_{29}, \lambda_{30}, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}, \lambda_{40}, \lambda_{41}, \lambda_{42} \geq 0$$

BCC çıktı odaklı model matematiksel formülasyonu:

Amaç Fonksiyonu: maks ϕ

$$\text{Girdi Kısıtı: } 1*\lambda_1 + 1*\lambda_2 + 1*\lambda_3 + 2*\lambda_4 + 2*\lambda_5 + 3*\lambda_6 + 1*\lambda_7 + 1*\lambda_8 + 1*\lambda_9 + 2*\lambda_{10} + 1*\lambda_{11} + 1*\lambda_{12} + 2*\lambda_{13} + 1*\lambda_{14} + 1*\lambda_{15} + 2*\lambda_{16} + 1*\lambda_{17} + 1*\lambda_{18} + 1*\lambda_{19} + 1*\lambda_{20} + 1*\lambda_{21} + 2*\lambda_{22} + 1*\lambda_{23} + 1*\lambda_{24} + 2*\lambda_{25} + 1*\lambda_{26} + 1*\lambda_{27} + 1*\lambda_{28} + 2*\lambda_{29} + 2*\lambda_{30} + 2*\lambda_{31} + 1*\lambda_{32} + 1*\lambda_{33} + 1*\lambda_{34} + 1*\lambda_{35} + 1*\lambda_{36} + 1*\lambda_{37} + 1*\lambda_{38} + 1*\lambda_{39} + 1*\lambda_{40} + 1*\lambda_{41} + 1*\lambda_{42} \leq 1$$

Her bir girdi için tekrar edilmiştir. Örnekte “Pist Sayısı” girdi değişkeni için formülasyon yazılmıştır.

$$\text{Çıktı Kısıtı: } 27539*\lambda_1 + 1246*\lambda_2 + 1727*\lambda_3 + 847*\lambda_4 + 50394*\lambda_5 + 71180*\lambda_6 + 15505*\lambda_7 + 2705*\lambda_8 + 1108*\lambda_9 + 11136*\lambda_{10} + 4682*\lambda_{11} + 5708*\lambda_{12} + 7945*\lambda_{13} + 6493*\lambda_{14} + 1918*\lambda_{15} + 4899*\lambda_{16} + 14583*\lambda_{17} + 1242*\lambda_{18} + 6233*\lambda_{19} + 1809*\lambda_{20} + 23161*\lambda_{21} + 46001*\lambda_{22} + 1877*\lambda_{23} + 11084*\lambda_{24} + 2858*\lambda_{25} + 736*\lambda_{26} + 9301*\lambda_{27} + 1503*\lambda_{28} + 4356*\lambda_{29} + 4181*\lambda_{30} + 18137*\lambda_{31} + 23900*\lambda_{32} + 2176*\lambda_{33} + 5005*\lambda_{34} + 11914*\lambda_{35} + 1193*\lambda_{36} + 2905*\lambda_{37} + 4389*\lambda_{38} + 3418*\lambda_{39} + 20820*\lambda_{40} + 14163*\lambda_{41} + 13368*\lambda_{42} \geq 27539*\phi$$

Tüm çıktı değişkenleri için tekrar edilmiştir. Örnekte “Uçak Trafikçi” değişkeni için formül yazılmıştır.

$$\text{Ağırlık Kısıtı: } \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6 + \lambda_7 + \lambda_8 + \lambda_9 + \lambda_{10} + \lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{16} + \lambda_{17} + \lambda_{18} + \lambda_{19} + \lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24} + \lambda_{25} + \lambda_{26} + \lambda_{27} + \lambda_{28} + \lambda_{29} + \lambda_{30} + \lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + \lambda_{35} + \lambda_{36} + \lambda_{37} + \lambda_{38} + \lambda_{39} + \lambda_{40} + \lambda_{41} + \lambda_{42} = 1$$

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}, \lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}, \lambda_{29}, \lambda_{30}, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}, \lambda_{40}, \lambda_{41}, \lambda_{42} \geq 0$$

Şans kısıtlı VZA modeli matematiksel formülasyonu:

Amaç Fonksiyonu: min θ

$$\text{Girdi Kısıtı: } 1*\lambda_1 + 1*\lambda_2 + 1*\lambda_3 + 2*\lambda_4 + 2*\lambda_5 + 3*\lambda_6 + 1*\lambda_7 + 1*\lambda_8 + 1*\lambda_9 + 2*\lambda_{10} + 1*\lambda_{11} + 1*\lambda_{12} + 2*\lambda_{13} + 1*\lambda_{14} + 1*\lambda_{15} + 2*\lambda_{16} + 1*\lambda_{17} + 1*\lambda_{18} + 1*\lambda_{19} + 1*\lambda_{20} + 1*\lambda_{21} + 2*\lambda_{22} + 1*\lambda_{23} + 1*\lambda_{24} + 2*\lambda_{25} + 1*\lambda_{26} + 1*\lambda_{27} + 1*\lambda_{28} + 2*\lambda_{29} + 2*\lambda_{30} + 2*\lambda_{31} + 1*\lambda_{32} + 1*\lambda_{33} + 1*\lambda_{34} + 1*\lambda_{35} + 1*\lambda_{36} + 1*\lambda_{37} + 1*\lambda_{38} + 1*\lambda_{39} + 1*\lambda_{40} + 1*\lambda_{41} + 1*\lambda_{42} \leq 1*\theta$$

Her bir girdi için tekrar edilmiştir. Örnekte “Pist Sayısı” girdi değişkeni için formülasyon yazılmıştır.

$$\begin{aligned} \text{Çıktı Kısıtı: } & 27539*\lambda_1 + 1246*\lambda_2 + 1727*\lambda_3 + 847*\lambda_4 + 50394*\lambda_5 + 71180*\lambda_6 + 15505*\lambda_7 + \\ & 2705*\lambda_8 + 1108*\lambda_9 + 11136*\lambda_{10} + 4682*\lambda_{11} + 5708*\lambda_{12} + 7945*\lambda_{13} + 6493*\lambda_{14} + 1918*\lambda_{15} + \\ & 4899*\lambda_{16} + 14583*\lambda_{17} + 1242*\lambda_{18} + 6233*\lambda_{19} + 1809*\lambda_{20} + 23161*\lambda_{21} + 46001*\lambda_{22} + 1877*\lambda_{23} \\ & + 11084*\lambda_{24} + 2858*\lambda_{25} + 736*\lambda_{26} + 9301*\lambda_{27} + 1503*\lambda_{28} + 4356*\lambda_{29} + 4181*\lambda_{30} + 18137*\lambda_{31} \\ & + 23900*\lambda_{32} + 2176*\lambda_{33} + 5005*\lambda_{34} + 11914*\lambda_{35} + 1193*\lambda_{36} + 2905*\lambda_{37} + 4389*\lambda_{38} + 3418*\lambda_{39} \\ & + 20820*\lambda_{40} + 14163*\lambda_{41} + 13368*\lambda_{42} \geq 27539 - (1.645*c*\sqrt{(\lambda_1^{**2} + \lambda_2^{**2} + \lambda_3^{**2} + \lambda_4^{**2} \\ & + \lambda_5^{**2} + \lambda_6^{**2} + \lambda_7^{**2} + \lambda_8^{**2} + \lambda_9^{**2} + \lambda_{10}^{**2} + \lambda_{11}^{**2} + \lambda_{12}^{**2} + \lambda_{13}^{**2} + \lambda_{14}^{**2} + \lambda_{15}^{**2} \\ & + \lambda_{16}^{**2} + \lambda_{17}^{**2} + \lambda_{18}^{**2} + \lambda_{19}^{**2} + \lambda_{20}^{**2} + \lambda_{21}^{**2} + \lambda_{22}^{**2} + \lambda_{23}^{**2} + \lambda_{24}^{**2} + \lambda_{25}^{**2} + \\ & \lambda_{26}^{**2} + \lambda_{27}^{**2} + \lambda_{28}^{**2} + \lambda_{29}^{**2} + \lambda_{30}^{**2} + \lambda_{31}^{**2} + \lambda_{32}^{**2} + \lambda_{33}^{**2} + \lambda_{34}^{**2} + \lambda_{35}^{**2} + \\ & \lambda_{36}^{**2} + \lambda_{37}^{**2} + \lambda_{38}^{**2} + \lambda_{39}^{**2} + \lambda_{40}^{**2} + \lambda_{41}^{**2} + \lambda_{42}^{**2} - 2*\lambda_1 + 1)) \end{aligned}$$

Tüm çıktı değişkenleri için tekrar edilmiştir. Örnekte “Uçak Trafikçi” değişkeni için formül yazılmıştır.

$$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}, \lambda_{17}, \lambda_{18}, \lambda_{19}, \lambda_{20}, \lambda_{21}, \lambda_{22}, \lambda_{23}, \lambda_{24}, \lambda_{25}, \lambda_{26}, \lambda_{27}, \lambda_{28}, \lambda_{29}, \lambda_{30}, \lambda_{31}, \lambda_{32}, \lambda_{33}, \lambda_{34}, \lambda_{35}, \lambda_{36}, \lambda_{37}, \lambda_{38}, \lambda_{39}, \lambda_{40}, \lambda_{41}, \lambda_{42} \geq 0$$

Tüm modeller Python programlama dilinde Anaconda Navigator – Jupyter Notebook programında çözülmüştür.

3.5. Etkin Karar Verme Birimlerinin Belirlenmesi

Modellerde karar verme birimlerinin etkinlik değerleri 1 ise etkin, değilse etkin değil olarak kabul edilmektedir. Stokastik modelde farklı olarak etkinlik değerleri 1 ve üzerinde olan karar verme birimleri etkin olarak belirlenmektedir. Uygulama sonucunda elde edilen değerler bu doğrultuda değerlendirilmiştir.

3.6. Performans İyileştirme

Etkin olmayan karar verme birimlerinin etkin hale gelebilmesi için girdi ve çıktılarında yapılması gereken potansiyel iyileştirmeler (PI) hedef değerler ile bulunabilmektedir (Özden, 2008).

$$PI(\%) = \frac{\text{Hedef} - \text{Gerçekleşen}}{\text{Gerçekleşen}} \times 100 \quad (1)$$

Yüzde olarak bulunan sonuç, eksi değer çıkarsa azaltılması gereken, pozitif değer çıkar ise artırılması gereken birimi ifade etmektedir.

4. BULGULAR

Çalışmada kullanılan girdi değerleri Tablo1’de bulunmaktadır.

Tablo 1. Karar Verme Birimlerine Ait Girdi Değerleri

HAVALİMANLARI	Çalışan Sayısı	İşletme Gideri	Terminal Alanı	Pist Sayısı	Apron Sayısı
Adana	399	20.656	12.745	1	4
Adıyaman	103	590	23.011	1	1
Ağrı Ahmed-i Hani	72	2156	23676	1	1
Amasya Merzifon	80	1.507	1.200	2	1
Ankara Esenboğa	799	163234	182000	2	8
Antalya	636	281606	178637	3	3
Balıkesir Koca Seyit	159	6631	23240	1	2
Batman	99	1.237	20.741	1	1
Bingöl	75	2936	3600	1	2
Bursa Yenişehir	191	3.076	12.716	2	1
Çanakkale	133	3601	11400	1	2
Denizli Çardak	133	3.171	16.890	1	1
Diyarbakır	162	8040	86571	2	1
Elâzığ	157	4.837	16.397	1	1
Erzincan Yıldırım Akbulut	106	3509	27132	1	2
Erzurum	207	19.314	12.950	2	4
Gaziantep	249	20387	22790	1	2
Hakkâri Yüksekova Selahaddin Eyyubi	67	2.741	6.700	1	1
Hatay	137	3798	43688	1	1
İğdir Şehit Bülent Aydın	72	1.509	3.460	1	1
Isparta Süleyman Demirel	134	3992	6770	1	1
İzmir Adnan Menderes	661	131.137	310.978	2	3
Kahramanmaraş	135	5.075	22.330	1	2
Kapadokya	143	3.655	3.500	1	1
Kars Harakani	89	2240	35946	2	1
Kastamonu	84	1.758	3.740	1	1
Kayseri	163	5328	22000	1	1
Kocaeli Cengiz Topel	89	2.168	2.100	1	1
Konya	182	4110	24175	2	1
Malatya	137	3.336	9.545	2	1
Milas-Bodrum	298	186396	110613	2	1
Muğla Dalaman	372	91.706	244.406	1	1
Muş Sultan Alparslan	96	4816	10300	1	1
Ordu-Giresun	127	7473	20250	1	1
Samsun Çarşamba	199	4.688	11.500	1	1
Sinop	62	1520	12695	1	1
Sivas Nuri Demirağ	118	4.663	20.047	1	2
Şanlıurfa GAP	115	3312	12000	1	1
Şırnak Şerafettin Elçi	67	4.077	4.000	1	1
Tekirdağ Çorlu Atatürk	153	1729	6521	1	2
Trabzon	264	17284	23745	1	1
Van Ferit Melen	161	5.442	14.800	1	1

Çalışmada kullanılan çıktı değerleri Tablo 2’de bulunmaktadır.

Tablo 2. Karar Verme Birimlerine Ait Çıktı Değerleri

HAVALİMANLARI	Uçak Trafığı	Yolcu Trafığı	Yük Trafığı	İşletme Geliri
Adana	27.539	2.507.344	27.475	72.160
Adıyaman	1.246	123.800	1.270	2.840
Ağrı Ahmed-i Hani	1727	208987	2210	3789
Amasya Merzifon	847	90.013	879	2.086
Ankara Esenboğa	50394	5162569	59236	183129
Antalya	71180	9711195	116303	1479018
Balıkesir Koca Seyit	15505	159026	1455	5286
Batman	2.705	371.583	3.883	5.561
Bingöl	1108	121382	1284	2269
Bursa Yenişehir	11.136	60.571	715	4.202
Çanakkale	4682	96564	659	1940
Denizli Çardak	5.708	233.197	2.310	9.314
Diyarbakır	7945	1115642	10423	23687
Elâzığ	6.493	541.827	5.896	11.473
Erzincan Yıldırım Akbulut	1918	223667	2172	5833
Erzurum	4.899	563.048	5.455	12.449
Gaziantep	14583	1390784	15017	43333
Hakkâri Yüksekova Selahaddin Eyyubi	1.242	96.025	1.267	2.409
Hatay	6233	635458	7223	18591
Iğdır Şehit Bülent Aydın	1.809	134.472	1.588	2.919
Isparta Süleyman Demirel	23161	42247	482	4044
İzmir Adnan Menderes	46.001	5.464.858	71.677	398.762
Kahramanmaraş	1.877	141.471	1.334	3.810
Kapadokya	11.084	134.135	1.308	5.209
Kars Harakani	2858	381123	4035	6075
Kastamonu	736	25.135	224	1.145
Kayseri	9301	1161159	14544	39384
Kocaeli Cengiz Topel	1.503	11.851	134	665
Konya	4356	495861	5664	16402
Malatya	4.181	478.082	4.544	8.077
Milas-Bodrum	18137	1480339	16052	345752
Muğla Dalaman	23.900	1.587.125	19.593	286.596
Muş Sultan Alparslan	2176	277960	2890	4661
Ordu-Giresun	5005	556432	5208	13437
Samsun Çarşamba	11.914	868.141	9.476	23.439
Sinop	1193	78028	720	1994
Sivas Nuri Demirağ	2.905	300.881	3.017	5.928
Şanlıurfa GAP	4389	407531	3805	8251
Şırnak Şerafettin Elçi	3.418	227.286	2.693	4.324
Tekirdağ Çorlu Atatürk	20820	22781	4289	5819
Trabzon	14163	1801600	17988	52296
Van Ferit Melen	13.368	976.311	9.996	16.656

Çalışmada Türkiye’de faaliyet gösteren 42 havalimanının deterministik (CCR-BCC) modelleri ile şans kısıtlı VZA modeli ile etkinlik ölçümleri yapılmıştır. Uygulama sonucunda girdi ve çıktı odaklı olarak analizi yapılan CCR modelinin girdi odaklı sonuçlarında, 0,131 etkinlik sonucu ile Kastamonu havalimanı gözlemlenen karar verme birimleri içerisinde en düşük değeri almıştır.

Kastamonu'nun ardından; 0,171 etkinlik sonucu ile Kahramanmaraş, 0,223 sonuç ile Kocaeli Cengiz Topel, 0,249 sonuçla Hakkâri Yüksekova Selahaddin Eyyubi havalimanı gelmektedir.

Çıktı Odaklı CCR modelinde ise; 7,618 etkinlik sonucu ile Kastamonu etkinsiz olarak değerlendirilmektedir. Daha sonra 5,838 sonuçla Kahramanmaraş, 4,493 puanla Kocaeli Cengiz Topel havalimanı etkinsiz karar verme birimi olarak gelmektedir.

CCR modelinde girdi odaklı ve çıktı odaklı model sonuçları aynı olmasa da etkinsizlik sıralamasının aynı olduğu sonucuna varılmıştır.

BCC modelinde birçok KVB etkin çıkmıştır. Erzurum havalimanı girdi odaklı modelde 0,519 sonuç ile etkinsiz çıkmıştır. Çıktı odaklı modelde ise 5,421 sonuç ile Kahramanmaraş havalimanı etkinsiz olmuştur.

Deterministik ve şans kısıtlı VZA uygulama sonuçları Tablo 3' de yer almaktadır.

Tablo 3. CCR ve BCC Modellerinin Etkinlik Sonuçları

KVB	CCR		BCC		CCDEA
	Girdi Odaklı	Çıktı Odaklı	Girdi Odaklı	Çıktı Odaklı	
Adana	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Adıyaman	0,843	1,187	1,000	1,000	0,843
Ağrı Ahmed-i Hani	0,439	2,279	1,000	1,000	0,439
Amasya Merzifon	0,468	2,137	1,000	1,000	0,468
Ankara Esenboğa	0,956	1,046	1,000	1,000	0,956
Antalya	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Balıkesir Koca Seyit	0,658	1,520	1,000	1,520	0,658
Batman	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Bingöl	0,292	3,421	1,000	1,490	0,292
Bursa Yenişehir	0,627	1,596	1,000	1,420	0,627
Çanakkale	0,276	3,620	1,000	3,437	0,276
Denizli Çardak	0,496	2,014	1,000	1,694	0,497
Diyarbakır	0,923	1,083	1,000	1,032	0,923
Elâzığ	0,577	1,733	1,000	1,708	0,577
Erzincan Yıldırım Akbulut	0,301	3,321	1,000	2,533	0,301
Erzurum	0,373	2,678	0,519	2,438	0,373
Gaziantep	0,781	1,280	1,000	1,151	0,781
Hakkâri Yüksekova Selahaddin Eyyubi	0,249	4,020	1,000	1,457	0,249
Hatay	0,772	1,295	1,000	1,255	0,772
İğdir Şehit Bülent Aydın	0,532	1,879	1,000	1,000	0,533
İsparta Süleyman Demirel	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
İzmir Adnan Menderes	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Kahramanmaraş	0,171	5,838	1,000	5,421	0,171
Kapadokya	0,991	1,009	1,000	1,000	0,991
Kars Harakani	0,730	1,370	1,000	1,000	0,730
Kastamonu	0,131	7,618	1,000	3,298	0,131
Kayseri	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Kocaeli Cengiz Topel	0,223	4,493	1,000	1,000	0,223

Konya	0,553	1,808	1,000	1,773	0,553
Malatya	0,742	1,348	1,000	1,214	0,742
Milas-Bodrum	0,763	1,310	1,000	1,000	0,763
Muğla Dalaman	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Muş Sultan Alparslan	0,408	2,450	1,000	1,833	0,408
Ordu-Giresun	0,593	1,688	1,000	1,447	0,593
Samsun Çarşamba	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Sinop	0,259	3,860	1,000	1,000	0,259
Sivas Nuri Demirağ	0,370	2,705	1,000	2,347	0,370
Şanlıurfa GAP	0,605	1,654	1,000	1,428	0,605
Şırnak Şerafettin Elçi	0,600	1,668	1,000	1,000	0,600
Tekirdağ Çorlu Atatürk	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Trabzon	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Van Ferit Melen	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000

Sonuçlar incelendiğinde; Adana, Antalya, Batman, Isparta Süleyman Demirel, İzmir Adnan Menderes, Kayseri, Muğla-Dalaman, Samsun Çarşamba, Tekirdağ Çorlu Atatürk ve Van Ferit Melen havalimanlarının etkinlik değerleri tüm modellerde “1” olarak sonuçlanmıştır. Bu durum 42 havalimanından 10 tanesinin etkin olduğunu göstermektedir.

Model sonuçlarında “CCDEA” etkinlik sonuçlarının “Girdi Odaklı CCR” modeli ile aynı çıktığı görülmektedir. Bunun nedeni ise c değeri değıştikçe (1’e yaklaştıkça), etkinlik değeri de 1 sonucuna yaklaşmasıdır; ancak kullanılan verilerin büyüklüğünden dolayı değışim çok küçük olmuştur.

Etkin olmayan karar verme birimleri için etkin karar birimleri ile referans kümesi oluşturulmaktadır.

Tablo 4. Referans Karar Verme Birimleri ve Yoğunluk Değerleri

KVB	Adana	Antalya	Batman	Isparta S.D.	Kayseri	Muğla D.	Samsun Ç.	Tekirdağ Ç.A.	Trabzon	Van F.M.
Adana	1,000									
Adıyaman			0,204		0,041			0,015		
Ağrı Ahmed-i Hani			0,038		0,168			0,003		
Amasya Merzifon	0,031						0,015			
Ankara Esenboğa	1,319	0,198								
Antalya		1,000								
Balıkesir Koca Seyit	0,062			0,596						
Batman			1,000							
Bingöl	0,029				0,007		0,045			
Bursa Yenişehir				0,366	0,054			0,103		
Çanakkale				0,097				0,057		0,093
Denizli Çardak				0,061	0,214			0,111		
Diyarbakır		0,010			0,880					
Elâzığ					0,234		0,061	0,030		0,221

Erzincan Yıldırım Akbulut					0,173					0,023
Erzurum	0,166	0,013			0,017					
Gaziantep	0,261	0,028			0,110				0,022	0,305
Hakkâri Yüksekova Selahaddin Eyyubi	0,009	0,001			0,061			0,019		
Hatay			0,163		0,494			0,058		
Iğdır Şehit Bülent Aydın	0,012				0,034		0,073	0,014		
Isparta Süleyman Demirel				1,000						
İzmir Adnan Menderes										
Kahramanmaraş		0,000		0,011	0,043					0,089
Kapadokya	0,049			0,421						
Kars Harakani			0,244		0,250					
Kastamonu		0,000			0,002		0,022	0,021		
Kayseri					1,000					
Kocaeli Cengiz Topel	0,006			0,058						
Konya			0,073		0,403			0,020		
Malatya					0,113		0,399			
Milas-Bodrum		0,205				0,148				
Muğla Dalaman						1,000				
Muş Sultan Alparslan	0,030	0,002			0,159					
Ordu-Giresun		0,008			0,326					0,108
Samsun Çarşamba							1,000			
Sinop			0,020		0,060			0,028		
Sivas Nuri Demirağ		0,001			0,174					0,091
Şanlıurfa GAP					0,253		0,109	0,023		0,019
Şırnak Şerafettin Elçi	0,064	0,003		0,025	0,033			0,028		
Tekirdağ Çorlu Atatürk								1,000		
Trabzon									1,000	
Van Ferit Melen										1,000

Referans birimlerin yoğunluk değeri ile tüm girdi ve çıktı değerleri çarpılarak birimler için hedef değerler bulunabilmektedir. Örneğin; “Çalışan Sayısı” girdi değişkeni için Adıyaman karar verme birimini incelediğimizde, Batman (0,204), Kayseri (0,041) ve Tekirdağ (0,015) havalimanlarının referans kümesini oluşturduğu görülmektedir. Çalışan sayıları ise sırasıyla; 99, 163 ve 153’tür. Adıyaman havalimanı çalışan sayısının hedef değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$(0,204 \times 99) + (0,041 \times 163) + (0,015 \times 153) = 29,174$$

Adıyaman havalimanında 2020 yılı için 103 personel olduğu bilinmektedir. Potansiyel iyileştirme, hedef değer ile gerçekleşen değer arasındaki farktan bulunmaktadır. Bu durumda potansiyel iyileştirme %71,68 olarak hesaplanmaktadır:

$$\frac{29,174 - 103}{103} \times 100 = \%71,68$$

Etkin olmayan karar verme birimlerine ait tüm potansiyel iyileştirme sonuçları (yüzde olarak) Tablo 5’te listelenmiştir. Etkin karar verme birimleri için hedef değer bulunmadığından, referans birimi kendileri olmaktadır. Etkin olmayan karar verme birimleri için ise en az bir adet etkin karar verme birimi referans kümesini oluşturmaktadır.

Tablo 5. Etkin Olmayan Karar Verme Birimlerinin Potansiyel İyileştirme Sonuçları

KVB	Çalışan Sayısı	İşletme Gideri	Terminal Alanı	Pist Sayısı	Apron Sayısı
Adıyaman	-71,68%	-15,75%	-77,28%	0,00%	0,00%
Ağrı Ahmed-i Hani	-56,12%	-56,12%	-80,98%	0,00%	0,00%
Amasya Merzifon	-80,98%	-53,20%	-53,20%	-50,00%	0,00%
Ankara Esenboğa	-18,41%	-49,19%	-71,35%	-4,40%	-26,65%
Balıkesir Koca Seyit	-34,23%	-44,81%	-79,24%	-34,23%	-57,81%
Bingöl	-70,77%	-70,77%	-70,77%	0,00%	-50,00%
Bursa Yenişehir	-61,43%	-37,33%	-65,89%	-73,83%	-37,33%
Çanakkale	-72,38%	-72,38%	-78,86%	0,00%	-50,00%
Denizli Çardak	-54,90%	-50,35%	-65,42%	0,00%	0,00%
Diyarbakır	-7,69%	-7,69%	-75,64%	-54,57%	-9,13%
Elazığ	-42,30%	-42,30%	-43,10%	-45,32%	-42,30%
Erzincan Yıldırım Akbulut	-69,89%	-69,89%	-84,69%	0,00%	-50,00%
Erzurum	-62,66%	-62,66%	-62,66%	-50,00%	-82,01%
Gaziantep	-21,86%	-21,86%	-30,71%	-21,86%	-21,86%
Hakkari Yüksekova Selahaddin Eyyubi	-75,13%	-75,13%	-75,13%	0,00%	0,00%
Hatay	-23,02%	-22,78%	-66,52%	-28,53%	-22,78%
İğdir Şehit Bülent Aydın	-62,36%	-46,79%	-46,79%	0,00%	0,00%
Kahramanmaraş	-82,87%	-82,87%	-89,19%	0,00%	-50,00%
Kapadokya	-47,01%	-26,57%	-0,91%	0,00%	-38,48%
Kars Harakani	-27,03%	-27,03%	-70,60%	-50,00%	0,00%
Kastamonu	-90,32%	-86,87%	-86,87%	0,00%	0,00%
Kocaeli Cengiz Topel	-88,62%	-83,66%	-77,74%	0,00%	0,00%
Konya	-58,26%	-44,70%	-56,50%	-50,00%	-48,44%
Malatya	-28,53%	-25,81%	-25,81%	-74,37%	-48,75%
Milas-Bodrum	-37,74%	-61,73%	-34,15%	-61,83%	-23,67%
Muş Sultan Alparslan	-59,19%	-59,19%	-59,19%	0,00%	0,00%
Ordu-Giresun	-40,74%	-40,74%	-50,10%	0,00%	0,00%
Sinop	-74,10%	-74,10%	-84,85%	0,00%	0,00%
Sivas Nuri Demirağ	-63,04%	-63,04%	-73,26%	0,00%	-50,00%
Şanlıurfa GAP	-39,54%	-39,54%	-39,54%	0,00%	0,00%
Şırnak Şerafettin Elçi	-40,04%	-40,04%	-40,04%	0,00%	0,00%

Potansiyel iyileştirme sonuçlarında negatif sayılar girdi miktarında azaltılması gereken miktarı, pozitif sayılar ise artırılması gereken miktarı göstermektedir (Babacan ve ark., 2007).

Modellerde etkinsiz çıkan Kastamonu havalimanının etkin olabilmesi için, çalışan sayısını %90,32, işletme giderini %86,87 ve terminal alanını %86,87 oranında azaltarak gerektiği görülmektedir; ancak çalışan sayısını %90,32 azaltması 84 çalışandan yalnızca 8 çalışanın bulunması gerektiğini belirtmektedir. Havalimanındaki istihdamı bu kadar azaltmak işletmeyi olumsuz yönden etkileyebileceğinden, çalışan sayısı minimum bulunması gereken bir sayı belirlenerek azaltılabilir.

Etkin olmayan birimlerin etkin hale gelebilmek için yapacakları değişimler işletmelerindeki çalışma sistemini düşünerek yapılmalıdır. Mevcut sayılardaki azaltma sistemi yavaşlatmayacak ve akışını bozmayacak düzeylerde olmalıdır. İşletmeler %100 verimli çalışamayabileceğinden etkin noktaya yaklaşabilecek ve faaliyetlerini kötü yönde etkilemeyecek düzeyde iyileştirmeler yapmalılardır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde ulaşım aracı olarak havayolu çok daha fazla tercih edilmektedir. Havalimanları ise verdikleri hizmet açısından bu noktada önem taşımaktadır. Ekonomik açıdan kaynakların doğru kullanılması tüm firmalar için önemlidir. Doğru ve yeterli kaynak kullanımı ile firmalar istedikleri hedeflere daha rahat ulaşabilmektedir.

Çalışmada Türkiye’de faaliyet gösteren ve Devlet Hava Meydanları İşletmesi Genel Müdürlüğü’ne bağlı 42 havalimanının 2020 etkinliği değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda literatür içerisinde etkinlik analizi çalışmalarında öne çıkan Veri Zarflama Analizi yöntemi kullanılmıştır. VZA yöntemi hem deterministik hem de stokastik modeller olarak iki yapıda uygulanmıştır. Stokastik VZA yöntemi literatürde şans kısıtlı VZA (CCDEA) olarak adlandırılmaktadır. Modellerde literatürde yapılmış çalışmalar göz önüne alınarak benzer olarak kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri alınmıştır. Girdi değişkenleri; çalışan sayısı, işletme gideri, terminal alanı, pist sayısı ve apron sayısı, çıktı değişkenleri ise uçak trafiği, yolcu trafiği, yük trafiği ve işletme geliri olarak belirlenmiştir.

Deterministik VZA modelleri (CCR ve BCC), girdi ve çıktı odaklı olarak iki yönelimle, şans kısıtlı VZA ise literatürde tek model olduğundan aynı şekilde uygulanmıştır. Modeller DHMİ’nin yayınladığı yıllık rapordan alınan verileriyle birlikte Jupyter Notebook programında Python programlama dili ile çözümlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bulgular altında listelenmiş ve modellerin uygulama sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, 42 havalimanı içerisinde Adana, Antalya, Batman, Isparta Süleyman Demirel, İzmir Adnan Menderes, Kayseri, Muğla-Dalaman, Samsun Çarşamba, Tekirdağ Çorlu Atatürk ve Van Ferit Melen havalimanlarının etkin olduğu görülmüştür. Bununla birlikte elde edilen sonuçlarda, tüm modellerde aynı karar verme birimlerinin (havalimanlarının) etkin olduğu gözlemlenmiştir. Benzer bir çalışma olan ve deterministik VZA ile analiz yapılan Yazgan (2012) çalışmasında 2008-2011 yılları için havalimanlarının etkinlik analizleri yapılmıştır. İki çalışmanın bulguları karşılaştırıldığında; Adana, Antalya ve Tekirdağ Çorlu Atatürk havalimanları yine uygulanan tüm modellerde etkin çıkmışlardır. Bununla birlikte Kahramanmaraş havalimanı yapılan uygulamada da “etkinsiz” olarak sonuçlanmıştır. Çalışmada Samsun Çarşamba, Isparta havalimanları etkin değilken, Milas Bodrum havalimanı etkin olarak belirtilmiştir.

Çalışma sonuçlarında görülmektedir ki yıllar içerisinde işletmelerin verimlilik oranları artabilir, azalabilir veya istikrarlı bir şekilde verimli olarak çalışmalarına devam edebilmektedirler.

Etkin olmayan karar verme birimleri için etkin birimlerden oluşan referans kümesi ve hedef değerlerin belirlenmesini sağlayan yoğunluk değerleri bulunmuştur. Daha sonra karar birimlerinin girdilerinde yapılması gereken değişiklikler için potansiyel iyileştirme oranları hesaplanmıştır.

Çalışma sonucunda 42 havalimanı içerisinde yalnızca 10 havalimanının etkin çıkması, Türkiye'deki havalimanlarında kaynak kullanıma oldukça dikkat edilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu konuda yöneticilerin havalimanlarının buldukları konumu göz önüne alarak bir çalışma yapması ve havalimanlarını etkin duruma getirmek için aksiyon alması gerekmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda havalimanları için farklı girdi ve çıktı değişkenleri ile etkinlik analizi yapılabileceği gibi, Türkiye'deki havalimanları ile farklı ülkelerin havalimanları etkinlikleri karşılaştırılarak etkinlik analizi yapılabilir. Ayrıca çalışmayı devam ettirmek isteyenler VZA ile etkinlik ölçümü yaptıktan sonra farklı modellerle gelecek yıllardaki girdi ve çıktı değişkenlerinin değerlerini bularak etkinlik analizlerini yıllara göre karşılaştırarak genel durumu inceleyebilirler. Bununla birlikte deterministik ve stokastik modellerle birlikte bulanık VZA modellerini kullanarak çalışmayı ilerletebilirler.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Akgöbek, Ö., Nişancı, İ., Serkan, K. & Tamer, E. (2015). Veri zarflama analizi yaklaşımını kullanarak bir eğitim kurumunun şubelerinin performanslarını ölçme. *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, 4(3), 43-54.
- Avcı, T. & Aktaş, M. (2015). Türkiye'de faaliyet gösteren havalimanlarının performanslarının değerlendirilmesi. *Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(3), 99-109.
- Aydın, B. I. & Borat, O. (2020). Bitkisel tarım etkinliğinin veri zarflama analizi ile ölçümü: Türkiye'de il düzeyinde bir çalışma. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20(39), 1-18.
- Babacan, A., Kartal, M. & Bircan, H. (2007). Cumhuriyet Üniversitesi'nin etkinliğinin kamu üniversiteleri ile karşılaştırılması: Bir VZA tekniği uygulaması. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 8(2), 97-114.
- Bousofiane, A., Dyson, R. G. & Thanassoulis, E. (1991). Applied data envelopment analysis. *European journal of operational research*, 52(1), 1-15.
- Bowlin, W. F. (1998). Measuring performance: An introduction to data envelopment analysis (DEA). *The journal of cost analysis*, 15(2), 3-27.

- Cook, W. D. & Seiford, L. M. (2009). Data envelopment analysis (DEA)–Thirty years on. *European journal of operational research*, 192(1), 1-17.
- Demireli, E. & Özdemir, Y. (2013). Seçilmiş Avrupa ülkelerinde makroekonomik performans ölçümü: Şans kısıtlı veri zarflama analizi ile bir uygulama. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 37, 303-320.
- Gedik, H. (2010). *Demir çelik ve demir alaşımları imalatı sektöründe stokastik veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü* [Doktora tezi]. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- İleri, İ. (1997). *Veri zarflama analizi ve bankacılık sektöründe bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kıyıldı, R. & Karaşahin, M. (2006). Türkiye'deki hava alanlarının veri zarflama analizi ile altyapı performansının değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 391-397.
- Kocakalay, Ş. (2003). *Veri zarflama analizi ve uygulamasına yönelik bir araştırma* [Yüksek lisans tezi]. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya.
- Kurşun, S. (2016). *Veri zarflama analizi ile performans değerlendirme: Katılım bankacılığı sektöründe bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Land, K. C., Lovell, C. K. & Thore, S. (1993). Chance-constrained data envelopment analysis. *Managerial and decision economics*, 14(6), 541-554.
- Oruç, K. O. (2008). *Veri zarflama analizi ile bulanık ortamda etkinlik ölçümleri ve üniversitelerde bir uygulama* [Doktora tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Isparta.
- Ömürbek, N., Demirgubuz, M. Ö. & Tunca, M. Z. (2013). Hizmet sektöründe performans ölçümünde veri zarflama analizinin kullanımı: Havalimanları üzerine bir uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 4(9), 21-43.
- Özbek, A. (2017). Çok kriterli karar verme yöntemleri ve Excel ile problem çözümü. *Seçkin Yayıncılık*, Ankara.
- Özden, Ü. (2008). Veri zarflama analizi (VZA) ile Türkiye'deki vakıf üniversitelerinin etkinliğinin ölçülmesi. *İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, 37(2), 167-185.
- Peker, İ. & Birdoğan, B. (2009). Veri zarflama analizi ile Türkiye havalimanlarında bir etkinlik ölçümü uygulaması. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18(2), 72-88.
- Topçuoğlu, Ö. (2016). *Özelleştirmenin etkinlik ve verimliliğe yansımaları: Çimento sektörü üzerine bir uygulama* [Doktora tezi]. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum.
- Turgutlu, E., Kök, R. & Kasman, A. (2007). Türk sigortacılık şirketlerinde etkinlik: Deterministik ve şans kısıtlı veri zarflama analizi. *İktisat İşletme ve Finans*, 22(251), 85-102.
- Ulutaş, B. B. (2006). *Türkiye'deki havaalanı etkinliklerinin veri zarflama analizi ile değerlendirilmesi*[Yüksek lisans tezi]. Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Yazgan, A. E. (2012). *Veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümleri ve havacılık sektöründe bir uygulama* [Doktora tezi]. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Tokat.
- Yazgan, A. E. & Karkacier, O. (2015). Veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümleri ve havalimanı işletmeciliği sektöründe bir uygulama. *Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 7(2), 15-28.
- Yeşilyurt, C. (2003). *Matematik programlama tabanlı etkinlik ölçüm yöntemlerinden veri zarflama analizi ile orta öğretimde etkinlik ölçümü* [Doktora tezi]. Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas.



Araştırma Makalesi / Research Article

**ÜRETİM PLANLAMADA BULANIK DOĞRUSAL PROGRAMLAMA
YÖNTEMİ: METAL SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA***

**FUZZY LINEAR PROGRAMMING METHOD IN PRODUCTION
PLANNING: AN APPLICATION IN THE METAL INDUSTRY**

Dilara ÖZÜLKÜ¹

Sibkat KAÇTIOĞLU²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1149499>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
ozulkudilara@gmail.com

Geliş Tarihi / Received
27.07.2022

Kabul Tarihi / Accepted
13.10.2022

Öz

Günümüzde hızla artan rekabet ortamı işletmelerin sahip olduğu kaynakları daha verimli kullanması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. İşletmelerin sahip oldukları kaynakları maksimum kâr sağlayacak bir şekilde müşterinin talep ve istekleri doğrultusunda doğru zamanda ve doğru miktarda sağlayabilmeleri hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple rekabet ortamında başarılı olmak ve kâr sağlamak amacıyla işletmeler üretim planlama alanına odaklanmışlardır. İşletmeler bu sayede üretim planlama ile olası talep artışlarına önceden çözümler bularak minimum maliyet ve maksimum kâr ile rakip işletmeler içerisinde en önde yer almaktadır. Üretim planlama konusu fazla kısıt ve kaynak bulundurma nedeniyle işletmelerin karar vermesi gereken önemli bir problemdir. Üretim planlama problemlerinde detaylı çözüme ulaşmak için en etkili ve hızlı yöntem yöneylem araştırmasının bir uygulaması olan doğrusal programlamadır. Doğrusal programlama ile işletmeler üretim planlama alanında karşılaştığı problemlere hızlı çözümler bularak karmaşık bir sistem de bile uygun optimal değere ulaşmaktadır. Bu çalışmada metal sektöründe faaliyet gösteren bir firmada üretim planlama problemi incelenmiş olup çalışmayı en iyi ifade eden model olan yöneylem araştırmasının bir yöntemi olan doğrusal programlama ile çözülmüştür. Model gerçek hayat problemlerinde verilerin kesin olmaması nedeniyle bulanık doğrusal programlamanın Verdegay yaklaşımı ile de çözülmüştür. Son olarak, Lingo bilgisayar programı yardımıyla çözüm sonucu bulunarak duyarlılık analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık doğrusal programlama, doğrusal programlama, üretim planlama, metal sektörü, Verdegay yaklaşımı.

Abstract

Today, the rapidly increasing competitive environment has revealed the need for businesses to use their resources more efficiently. It is vital for businesses to provide their resources at the right time and in the right amount in line with the demands and wishes of the customer in a way that will ensure maximum profit. For this reason, businesses have focused on production planning in order to be successful and profit in the competitive environment. In this way, businesses are at the forefront of competing businesses with minimum cost and maximum profit by finding solutions to possible demand increases with production planning. Production planning is an important problem that businesses need to decide because it has too many constraints and resources. Linear programming, which is an application of operations research, is the most effective and fast method to reach detailed solutions in production planning problems. With linear programming, businesses find fast solutions to the problems they encounter in the field of production planning and reach the appropriate optimal value even in a complex system. In this study, the production planning problem in a company operating in the metal sector was examined and it was solved by linear programming, which is a method of operations research, which is the model that best expresses the work. The model is also solved with the Verdegay approach of fuzzy linear programming due to the inconsistency of the data in real life problems. Finally, a sensitivity analysis was performed by finding the solution result with the help of Lingo computer program.

Keywords: Fuzzy linear programming, linear programming, production planning, metal sector, Verdegay approach

*Bu yayın Dilara ÖZÜLKÜ isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. ozulkudilara@gmail.com, Orcid.org/0000-0003-3322-1048.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. skactioglu@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-8529-3775.

1. GİRİŞ

Günümüzün küresel ve dünya çapındaki pazarlarda faaliyet gösteren rekabetçi firmalar için verimlilik kavramı son derece önemlidir. Verimliliğin artması özellikle imalat sektöründe faaliyet gösteren işletmeler için önemli bir hedeftir. Rekabetçi kalabilmek için şirketler, ürünlerini yalnızca yüksek verimlilikle üretmekle kalmayıp, aynı zamanda pazar değişikliklerine ve müşterilerin ihtiyaçlarına hızlı yanıt verebilen üretim sistemlerini kullanmalıdır (Argoneto ve ark., 2008).

Üretim kavramı girdilerin potansiyel faydanın istenen ürüne dönüştürülebildiği süreçlerin uygulanmasını içerir (Garg, 2011). Üretim işletmelerinin artan rekabet ortamına uyum sağlamak için maksimum kâr ve sınırlı kaynak kullanımı istemesi üretim planlama ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Üretim planlama, üretimin başlangıcından beri endüstrinin ayrılmaz bir parçası olmuştur (Kempf ve ark., 2011). Üretim planlaması, üretim öncesi bir faaliyettir. İnsan gücü, malzeme, makine ve üretim süreci gibi üretim gereksinimlerinin önceden belirlenmesidir. Ray Wild, “Üretim planlaması, ürünlerin gelecekteki üretimi için gerekli tüm tesislerin belirlenmesi, satın alınması ve düzenlenmesidir” şeklinde tanımlamaktadır (Kumar & Suresh, 2009). Planlama, personelin üretimle ilgili tüm faaliyetlerinden müşterinin istediği doğru teslimat sürelerine kadar birçok üretim unsurunu içerir. Etkin bir üretim planlama operasyonu ile herhangi bir üretim süreci, tüm potansiyelini kullanma yeteneğine sahiptir (Telsang, 2018).

İşletmelerde görülen üretim planlaması problemleri çok sayıda değişken ve kaynak kullanımına sahiptir. Planlamada karşılaşılan problemler için çözüm yöntemleri farklılık gösterse de kullanılan en yaygın çözüm yöntem araştırmasının deterministik modeli doğrusal programlamadır. 1947 yılında II. Dünya Savaşı sırasında George B Dantzing tarafından askeri lojistik problemlerini çözmek için geliştirilen doğrusal programlama günümüzde tüm alanlarda kullanılmasının yanı sıra özellikle planlama alanında karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Kavram olarak Doğrusal Programlama; doğrusal eşitlik veya eşitsizlik sınırlayıcı şartları altında, yine doğrusal bir amaç fonksiyonunu optimize (maksimize veya minimize) etmek olarak tanımlanabilir (Kaçtıoğlu, 2020). Bu şekilde doğrusal programlama, üretim planlamada karar vericilerin kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmalarını sağlayarak optimal çözüme ulaşmada yardımcı olur.

Bu çalışmada metal sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın üretim planlaması için doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur. Bu amaçla, uygulamanın gerçekleştirildiği fabrikada üç aylık veriler ışığında karar değişkenleri olarak kırk adet ürün ele alınmıştır. Ele alınan bu ürünler özelinde kârı maksimum yapan doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur. Makine, hammadde, asgari talep miktarı ve tamamlayıcı parça kısıtları altında model incelenmiş ve sonucunda optimum çözüme ulaşılmıştır. Çalışma doğrusal programlama yazılımlarından Lingo ile çözülmüştür.

Çalışmada gerçek hayatta talep verilerinin kesin olmadığı varsayılarak Bulanık Doğrusal Programlama'nın Verdegay yaklaşımı ile de çözümlenmiştir. Son olarak duyarlılık analizi yapılarak bazı önerilerde bulunulmuştur. Araştırmada öncelikle üretim planlamada doğrusal programlama ile ilgili literatür gözden geçirilmiştir. Daha sonra üretim planlama, doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama modeli ele alınarak teorik olarak incelenmiştir. Metal sektörüne ait karar değişkenleri ve bu değişkenlere uygun modelleme yapılmış olup kâr maksimizasyonu yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ile doğrusal programlama, bulanık doğrusal programlama ve üretim planlama açısından literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Rekabet halinde olan günümüz işletmeleri için her konuda esneklik ve müşteri isteklerindeki değişime hızlı cevap verebilmesi önemli bir gerekliliktir. Bu esneklik ve verimlilik için en önemli bileşenlerden birisi planlamadır. İşletmeler doğru planlama ile sahip oldukları kaynakları etkin bir şekilde kullanarak rekabete uyum sağlamaya çalışmaktadır. Planlamanın çözüm yönteminin fazla olmasının yanı sıra fazla kaynakların ve kısıtların olduğu düşünüldüğünde matematiksel bir model kullanılması önemli olmaktadır. Bu sebeple karşılaşılan üretim planlama problemlerinin çözüm yöntemlerinde doğrusal programlamayı ve bulanık doğrusal programlamayı sıkça görmek mümkündür. Bu tür problemlerin çözümü için yazılım da kullanılmaktadır.

Bu bölümde üretim planlamada doğrusal programlama konusu üzerinde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalardaki amaçlar ve sonuçlar irdelenmiştir.

Yakar (2002), incelediği çalışmasında üretim planlama probleminde doğrusal programlamayı kullanmıştır. Çalışması sonucunda üretim planlaması açısından işletmeye sağlanan kaynak tasarrufu ve kazancın arttığını görmüştür. Modelini cebirsel modelleme dili AMPL (A Modeling Language For Mathematical Programming) ile çözümlenmiştir (Yakar, 2002).

Yu Da (2004), tez çalışmasında bir petrol şirketinin üretim planlama modeli ve çözüm yöntemleri, problemin önemli özellikleri vb. gibi konuları incelemiştir. Bu, gerçek hayatta da optimizasyon uygulamak için tipik bir örnektir. Modeli derinlemesine incelemek için çalışmanın ilk bölümünde doğrusal programlamanın özellikleri, doğrusal programlama çözüm algoritmaları yer almaktadır. Daha sonra duyarlılık analizi yapılmıştır (Yu Da, 2004).

Aydın (2006), çalışmasında tuğla sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikada doğrusal programlamanın üretim planlama alanında uygulamasını yapmıştır. Hammadde, talep ve üretim kısıtları altında kurulan model Excel çözücü ile model sonucunda kâr maksimizasyonu elde edilmiştir (Aydın, 2006).

Tuş (2006), Denizli bölgesinde mermer üretim işletmesi için bulanık doğrusal programlama modelini kurarak başta Verdegay yaklaşımı olmak üzere model için optimal sonuçları incelemiştir. Modelinde belirsizlikleri azaltarak bulanık doğrusal programlamanın etkinliğini ele almıştır (Tuş, 2006).

Kaya (2007), çalışmasında otomotiv yan sanayi firmasında yakıt hortumu üretimine ait üretim planı için bulanık doğrusal programlama ile optimal çözüm bulunmuştur (Kaya, 2007).

Zongxiang (2008), ana konusu kısıtlar teorisini incelemek olan bu çalışmada bir yağ pompası işletmesi için doğrusal programlama modeli kurmuş ve çalışma süresi, envanter seviyesi gibi kısıtlar altında inceleme yapmıştır. Müşteriden alınan beş adet sipariş montaj merkezinde yer alan üç adet ekipmanların siparişlere ve her ekipmanın işleme kapasitesine göre en düşük kullanım maliyetini sağlaması için ayrıntılı bir üretim planının nasıl formüle edileceği en basit çizelgeleme problemlerinden biri incelenmiştir. Doğrusal programlamayı benimseyen çalışmada çözüm Lindo programıyla bulunmuştur (Zongxiang, 2008).

Maturana & Pizani (2009), çalışmalarında Şili'de bulunan bir kereste fabrikasının planlama sürecini desteklemek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelde stok maliyeti, stokta kalma maliyetini ve hammadde maliyetinin minimum olması amaçlanarak maliyet minimizasyonu yapılmıştır. Çalışmalarında bir aylık planlama süresi için bir kereste fabrikasının çizelgeleme ve üretim planlamasıyla ilgili karmaşıklıkların çoğunu hesaba katan bir matematiksel model geliştirmiştir (Maturana ve Pizani, 2009).

Ergülen & Büyükkeklik (2010), çalışmalarında prefabrik üretim yapan bir işletmenin kısa dönemli üretim planlaması problemi ele alınarak doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur. Çalışmada ürünün teslim tarihlerine uyulması, işgücünün verimli kullanımı ve uygulamaya ait yapı elemanlarının boş kalmaması istenmektedir. Uygulanacak doğrusal programlama modeli Microsoft Excel makroları ile çözülmüş ve çözüm sonucunda üretim planlamanın amaçlarına uygun olarak yapılması sağlanmıştır. Önerilen model değişen müşteri isteklerine ve ürün sayılarına göre de tekrar kullanılabilir (Ergülen & Büyükkeklik, 2010).

Yingfeng & Dawei (2011), çalışmalarında Çin kökenli elektrikli ekipman üretim şirketinde zaman kısıtlamalarına dayalı üretim sürecini optimize etme sorununu ele almışlardır. Üretim sürecinin optimizasyonunu çözmek için karma tamsayılı model önerilmiştir. Amaç, zaman kısıtını karşılayarak üretim sürecinin toplam maliyetini minimize etmektir. Örnek olay incelemesi olarak Çin menşeli elektrikli ekipman üretim fabrikasında üretilen elektronik bir ürünün üretim sürecinin optimizasyon problemi incelenmiş ve problem çözümü için Lingo 9.0 kullanılmıştır (Yingfeng & Dawei, 2011).

Al-kuhali ve ark. (2012), üretim planlamasının farklı sektörlerde yer alan bir incelemesini ele alan çalışmada LCD (Liquid Crystal Display) ekran üretimi için üretim planlama problemi doğrusal programlama ve sonrasında duyarlılık analizi ile çözüm bulunmuştur. LCD üretimi için üretim için hat alanı, ürün montajı, kalite kontrol ve ambalajlama ile ilgili kısıtlamalar oluşturulmuştur. Modelleme sonucunda üç senaryo belirlenerek amaç fonksiyonunu maksimum yapan değer belirlenmiştir (Al-kuhali ve ark., 2012).

Maltepe (2012), çalışmada bir petrol rafine şirketinde doğrusal programlama üzerine çalışmıştır. Şirket kârını maksimum yapmayı amaçlayan modelde hammadde, işçilik gibi kısıtlayıcı faktörler ele alınmıştır. Çözüm sonucu WINQSB 2.0 programıyla bulunmuş ve şirket kârını arttırıcı bir çalışma niteliğinde olmuştur (Maltepe, 2012).

Çetindere ve ark. (2015), üretim planlama ve doğrusal programlamanın işletmeler açısından önemi incelenerek konfeksiyon işletmesinde uygulaması yapılmıştır. Makine, işgücü, hammadde kısıtları altında doğrusal programlama ile incelenen model WinQSB 1.0 paket programıyla çözüme ulaşmıştır. Kaynaklarda herhangi bir değişimin amaç fonksiyonuna etkisi incelenmiş ve duyarlılık analizine yer verilmiştir (Çetindere ve ark., 2015).

Ekmekçi (2015), yaptığı çalışmada sanayi işletmeleri için önemli olan planlama konusunun önemini vurgulayarak bu alandaki problemlerin çözümü için doğrusal programlama konusunu incelemiş ve güneş enerjisi sistemleri ve yenilenebilir enerji sektöründe yer alan işletmenin talep tahminleri doğrultusunda kârı maksimum yapacak ürünlerin yıllık üretim planını verecek doğrusal programlama modelini oluşturmuş ve Lindo programı ile çözümlenmiştir (Ekmekçi, 2015).

Erfanian & Pirayesh (2016), toplu üretim planlaması konusunu ele alarak sınırlı işgücü ve ekipman kaynakları ile toplam üretim maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada her dönemde optimal üretim planını ve önleyici bakımı belirlemek için entegre bir toplu üretim planlaması ve bakım planlaması modeli geliştirilmiştir. Tanıtılan modelin performansını sergilemek için bir ilaç firmasında bir karma tamsayılı doğrusal programlama vaka çalışması yapılmış ve sonuçları ifade edilmiştir (Erfanian & Pirayesh, 2016).

Aboudhier (2017), Libya'da bulunan önemli bir gıda şirketinde ekonomik kaynakların en uygun şekilde tahsis edilmesi amacıyla doğrusal programlamadan yararlanarak optimal sonuca ulaşılmıştır. Gıda şirketinin meyve suyu için hammadde gereksinimleri ve diğer üretim verileri ile alınan bilgilere göre matematiksel model formüle edilmiştir. Çalışma Microsoft Excel Çözücü ile çözülmüştür (Aboudhier, 2017).

Uzunkaya & Gül (2017), doğrusal programlama üzerinde planlama uygulamaları birçok sektöre konu olmaktadır. Farklı sektörlerde incelenen doğrusal programlama konusu tarımsal işletmeler için planlama problemlerinde de çözüm yöntemi olarak bu çalışmada incelenmiştir. Afyonkarahisar ilinde tarımsal bir işletmenin optimum ürün planı ele alınarak iş gücü, bitki su ihtiyaçları ve su ücreti ödeme kısıtları altında WinQSB yazılımı ile çözüme ulaşılarak mevcut kâra göre artış elde edilmiştir (Uzunkaya & Gül, 2017).

Men & Yin (2018), yaşamın bir parçası olan su kaynaklarını konu edinen çalışmada Kuzey Çin'nin su kıtlığı yaşaması sonucunda su kaynaklarının tahsisini optimize etmek amacıyla bu çalışma yapılmıştır. Genel su kaynakları planlama modellerinde, karar değişkenleri genellikle negatif olmayan gerçek sayılar olarak belirtilir. Bununla birlikte, personel ve ekipmanın yerleştirilmesi, yatırım projelerinin seçimi, geliştirme gibi bazı fiili işlerde karar değişkenlerinin tamamı veya bir kısmı tamsayılardır. Modelde inşa edilmesi düşünülen dört proje tam sayılı doğrusal programlama modeli kurularak çözümlenerek Lingo programı ile model çözümlenmiştir (Men & Yin, 2018).

Oğlak (2018), çalışmasında alüminyum sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın kârını maksimize edecek doğrusal programlamayı ele almıştır. Belirli kısıtlar altında matematiksel bir model oluşturmuştur. Modelin çözümü için Lindo programı kullanılmış ve duyarlılık analizi yapılarak farklı modeller tasarlanmıştır (Oğlak, 2018).

Almeida (2019), bu vaka çalışması alüminyum profillerin geliştirilmesi ve üretimi olan alüminyum pazarında faaliyet gösteren bir şirketin gerçek bir örneğini ele almaktadır. Amaç, yaygın olarak bilinen üretim israfını diğer bir ifadeyle hurda miktarını en aza indirmektir. Hurda miktarının nedeni olarak kalıp değişimlerini gören model kalıp değişimlerini en aza indirmeyi amaçlar (Almeida, 2019).

Ünüçok (2019), tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede doğrusal programlama kullanılarak üretim kaynaklarının optimal şekilde kullanılması ve bu şekilde üretim planının belirlenmesi çalışılmıştır. Lingo paket programıyla kâr maksimizasyon problemi çözümlenmiştir (Ünüçok, 2019).

Guo (2020), çalışmasında üretim planlama problemini doğrusal programlama yöntemiyle incelemektedir. Çinli bir gıda şirketinin doğrusal programlama çalışması ve brüt kâr marjı hesaplama yöntemi çalışmasında işletmenin kârını maksimize etmenin etkili bir yolu bulunmuştur. Doğrusal programlama modeli olarak üç spesifik ürünün üretim verileri toplanarak matematik modeli oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu olarak kazanç kârı, kısıtlamalar olarak üretim politikaları kullanılarak üretim planlamada doğrusal planlama uygulamasının en etkili örneği incelenmiştir (Guo, 2020).

Deste & Karabulut (2021), tekstil işletmesinde işçilik, hammadde gibi kısıtlar altında üretim planlama problemi doğrusal programlama modeli üzerinde incelenmiştir. Çalışmanın amacı işletmenin stoka üreteceği uygun ürün miktarını belirlemek ve kâr maksimizasyonunu sağlamaktır. Model QM for Windows 4.0 paket programıyla çözümlenmiştir (Deste & Karabulut, 2021).

Üretim planlama problemlerinde doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama çalışmaları ile ilgili incelenen literatür, yapılacak araştırmanın teorik yapısının oluşturulabilmesi ve genel çerçevesinin belirlenmesi için ele alınmıştır. Bu incelemeler sonucunda, uygulama için karar değişkenlerinin ve kısıtlamaların belirlenmesi literatür taramasından hareketle oluşturulmuştur. Üretim planlama alanında deterministik modeller içerisinde en fazla bulanık doğrusal programlama ve doğrusal programlama tercih edilmektedir. Bu sebeple çalışmada, üretim planlama amaçlı doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama problemi çözümlenmiştir.

3. PROBLEM TANIMI VE METODOLOJİSİ

Bu çalışmada, metal sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikanın üretim planlama probleminin karar değişkenleri maksimum kâr sağlama için doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama modeli kurulmuştur. Üç aylık makine, hammadde ve asgari talep miktarı gibi işletme verileri kullanılarak maksimum kâr elde edilmeye çalışılmıştır. İşletmedeki üretim planlama problemi bulanık doğrusal programlama modeliyle modellenerek Lingo 19.0 programıyla optimal çözüme ulaşılmıştır. Gerçek hayatta talep verilerinde kesinlik olmadığından model bulanık doğrusal programlama ile de çözümlenmiştir. Çözüm sonucunda işletme kârını maksimum yapan karar değişkeni değerleri bulunmuştur. Son olarak duyarlılık analizi yapılarak bazı değerlendirmeler yapılmıştır.

3.1. Doğrusal Programlama

İşletmelerde yöneticilerin verdiği önemli kararların birçoğu, imkanlar bakımından yöneticiyi sınırlandıran durumlara bağlı olarak, işletme amaçlarını gerçekleştirmek için en uygun yolu ulaşmadır. En uygun yol; kârın maksimum yapılması veya maliyetin minimum yapılması ile belirlenir. Bu amacın gerçekleştirilmesi, çoğunlukla yöneylem araştırmasının, doğrusal programlama tekniğiyle çözüme kavuşturulmaktadır (Aladağ, 2011).

Doğrusal Programlama; doğrusal eşitlik veya eşitsizlik sınırlayıcı şartları altında, yine doğrusal bir amaç fonksiyonunu optimize (maksimize veya minimize) etmek olarak tanımlanabilir (Kaçtıoğlu, 2020). Bu nedenle, doğrusal programlama, tüm uygulanabilir alternatifler arasında (matematiksel modele göre) belirtilen hedefe en iyi şekilde ulaşan optimal bir sonuç elde etmek için faaliyetlerin planlanmasını içerir (Hillier & Lieberman, 2015).

Doğrusal programlamada bir model, araştırılan tipik bir problemin yalnızca temel yönlerinin veya en önemli özelliklerinin dikkate alındığı gerçek yaşam sisteminin idealize edilmiş bir temsili olarak tanımlanabilir. Bu modelin amacı, işletme performansını iyileştirmek amacıyla sistemin davranışını analiz etmek (Bhunia & Sahoo, 2019) ve karar vericilere sistemin operasyonlarını içeren sorunları çözmeleri için bilimsel bir temel sağlamak ve organizasyonun yararına olan bir çözüm sunmaktır. Çözüm, problemin optimum çözümü olarak adlandırılır (Gupta, 2015). Doğrusal Programlama modellemesi için gereken adımları şu şekilde sıralamak mümkündür:

1. Karar değişkenlerinin tanımlanması ve uygun semboller ile gösterilmesi.
2. Kurulacak modelin amacının belirlenmesi ve karar değişkenlerinin yazılması.
3. Modelde yer alan tüm kısıtların eşitlik veya eşitsizlik olarak ifade edilmesi olarak sıralanmaktadır.

Doğrusal programlama modelinde üç temel fonksiyon bulunur. Bunlar amaç fonksiyonu, kısıt denklemleri ve negatif olmama koşulu olarak ayrılmaktadır. Amaç fonksiyonunda işin maliyeti, üretim için harcanan zaman, tezgâhın boş kalma süresi gibi faktörler minimum edilmeye çalışılırken; toplam kâr, üretilen ürün miktarı, satış miktarı da maksimum yapılmak istenir. Kısıt denklemleri ise zaman, işgücü, talep miktarı, tezgâh sayısı, hammadde ve işletme sermayesidir.

Amaç fonksiyonu karar değişkenleri ve sabit katsayıların toplamı ile gösterilir. Amaç genellikle kâr maksimizasyonu veya maliyet minimizasyonu şeklinde olmaktadır. Fonksiyona ait karar değişkenleri x_1, x_2, \dots, x_n ile değişkenlere ait katsayılar c_1, c_2, \dots, c_n ile gösterilirse amaç fonksiyonu formülü aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\text{Maksimize veya Minimize } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \quad (1)$$

İşletmelerin sahip oldukları kaynaklarında belli bir sınıra sahip olmasaydı sınır gerektiren doğrusal programlama gibi matematiksel yöntemlere de gerek olmazdı. Bu nedenle bir doğrusal programlama modelinde kısıt denklemleri bulunmaktadır. Sistemde kullanılacak kaynak miktarlarını yani sabit sayılarını b_1, b_2, \dots, b_i ve bu kaynaktan birim başına kullanılan girdi miktarını $a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}$ olarak tanımlanırsa kısıt denklemleri için formül aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n & (\leq, =, \geq) b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n & (\leq, =, \geq) b_2 \\ \dots & \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n & (\leq, =, \geq) b_m \end{aligned} \quad (2)$$

Modelleme aşamasının son adımı negatif olmama koşuludur. Doğrusal programlama modellerinde gerçek problemler ele alındığından negatif olma durumu bulunmaktadır fakat bir fabrika için düşünersek üretimin gerçekleşmesi durumu pozitif bir durumken; üretimin gerçekleşmemesi durumu sıfıra eşit bir durumdur. Bu halde negatif bir ifade yer almadığından değişkenlerin pozitif olması gerekmektedir. Bu sebeple negatif olmama koşulu;

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Bahsedilen bu formüllerin sigma notasyonu halinde özetlemek gerekirse aşağıdaki gibi olmaktadır:

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Maksimize veya Minimize } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (4)$$

Kısıt Denklemleri:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j (\leq, =, \geq) b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

Negatif olmama koşulu:

$$x_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

3.2. Bulanık Doğrusal Programlama

Günlük hayatta karşılaşılan pek çok karar verme problemi doğrusal programlama problemi olarak formüle edilebilir. Ancak çoğu durumda, doğrusal programlama problemlerinde kısıtların veya amaç fonksiyonlarının kesin olarak belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Bu gibi durumlarda bulanık doğrusal programlama (BDP) yöntemlerine başvurulur (Paksoy ve ark., 2013). Bulanık Doğrusal Programlama (BDP), kesin olmayan veriler ve kısıtlamalarla çalışmayı sağlayarak daha gerçekçi modellere ulaşmayı sağlar (Nasseri ve ark., 2019).

Klasik doğrusal programlama problemlerinden farklı olarak bulanık doğrusal programlama modellerinde amaçlarda veya kısıtlarda bulanık simgesi “~” kullanılmaktadır. Bulanık olan kısımlar için güven aralığı $[0,1]$ olan üyelik fonksiyonu belirlenmektedir (Erdaş & Demir, 2016). Bulanık doğrusal programlama problemlerinin en genel gösterim şekli,

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Maksimize veya Minimize } Z = \sum_{j=1}^n \tilde{c}_j \tilde{x}_j \quad (7)$$

Kısıt Denklemleri:

$$\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \tilde{x}_j (\leq, =, \geq) \tilde{b}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

Negatif olmama koşulu:

$$\tilde{x}_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

Denklemlerde \tilde{a}_{ij} , \tilde{b}_i , \tilde{c}_j ifadeleri bulanık sayıları, \tilde{x}_j değeri bulanık karar değişkenlerini ifade etmektedir.

3.2.1. Verdegay Yaklaşımı

Sağ taraf değerleri bulanık olan problemlerin kesin parametrik doğrusal programlama problemine eşit olduğunu Verdegay(1982) kanıtlamıştır. Modelde sadece sağ taraf sabitlerinin bulanık olması nedeniyle bu yaklaşım tercih edilmektedir. Buna göre Verdegay tarafından tanımlanan üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır (Lai ve Hwang, 1992):

$$\mu(Ax)_i = \begin{cases} 0 & , (Ax)_i > b_i + p_i \\ 1 - \frac{(Ax)_i - b_i}{p_i} & , b_i \leq (Ax)_i \leq b_i + p_i \\ 1 & , (Ax)_i < b_i \end{cases} \quad (10)$$

Buna göre model aşağıdaki gibi gösterilir ve formülde $1-\alpha$ yerine θ parametresi de yazılarak parametrik çözüm de elde edilmektedir:

Maksimize veya Minimize $Z = c^T x$

$$\begin{aligned} (Ax)_i &\leq b_i + (1 - \alpha)p_i \quad \text{ve} \quad (Ax)_i \leq b_i + \theta p_i \\ \alpha &\in [0,1] \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

Burada α memnuniyet derecesi (kısıtlardan sapmama derecesi) ve θ memnuniyetsizlik derecesi (kısıtlardan sapma derecesi) olarak adlandırılır. Burada memnuniyet derecesi %100 iken kısıtlardan sapma derecesi sıfır düzeyinde olmaktadır.

4. UYGULAMA

Çalışmanın bu bölümünde, metal sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin üretim planlama problemi doğrusal programlama ile çözümlenmiştir. Bu modelin kurulmasındaki amaç, işletmenin kârını maksimum yapmaktır. Uygulama yapılan işletmenin en temel problemi kaynakların etkili bir şekilde kullanılmamasıdır. Fakat kaynakların etkili bir şekilde kullanılmasıyla ve kurulacak bulanık doğrusal programlama modeliyle kâr maksimizasyonunun sağlanması gereklidir. Bu nedenle ilk olarak çalışmada işletmenin üç aylık verileri kullanılmıştır. 1 Ocak-31 Mart 2022

dönemini kapsayan bu süreçte ürünlerin birim maliyetleri, satış fiyatları ve o aylar içerisinde açılan talep miktarları verileri işletme sisteminde elde edilmiştir. İşletme kaynakları ve kısıtları altında doğrusal programlama modeli elde edilmiş ve Lingo 19.0 paket programıyla model çözümlenmiştir.

4.1. Uygulama Yapılan İşletmenin Tanıtılması

Metal sektöründe faaliyet gösteren firma, 1979 yılında İstanbul 4. Levent'te öncelikle beyaz eşya sektörü için üretime başlamış, artan müşteri taleplerine karşılık verebilmek için 2003 yılında İstanbul Sancaktepe bölgesindeki fabrikaya taşınmıştır. Türkiye'nin lider beyaz eşya üreticilerinden en büyük sac parça ve kalıp tedarikçileri arasında yerini almıştır. Yerli ve yabancı fırın üreticilerinin tedarikçileri arasında en önde yer almıştır. Aynı zamanda Polonya, Almanya, İspanya, Rusya, Amerika ve Romanya başta olmak üzere birçok ülkeye ihracat yapmaktadır. Günümüzde toplam 20.000 m² kapalı alanda, 3 yerleşkede 500'den fazla çalışanıyla üretimine devam etmektedir.

4.2. Uygulamadaki Ürünler ve Üretim Süreçleri

Uygulamaya konu olan işletme molalar haricinde 9 saat çalışma süresine sahiptir. Hafta sonları cumartesi günleri de çalışma olması nedeniyle aylık 24 gün çalışma süresi üzerinden model oluşturulmuştur. Uygulamaya konu olan ürünler beyaz eşya ürünlerinin alt montaj parçalarıdır. Montajlı ve montajsız sac parçalar kategorisine giren bu ürün grubu kendi içerisinde fırın grubu, bulaşık makinesi grubu, çamaşır makinesi grubu, soğutucu grubu ve buzdolabı grubu olmak üzere 5 kategoriye ayrılmaktadır. Bu 5 kategori için üretilen ve uygulamada kullandığımız ürünlerin ürün grubu ve adları aşağıdaki Tablo 1'de listelenmiştir:

Tablo 1. Ürünlerin Adları

Ürün Grubu	Malzeme Adı
FIRIN	Menteşe Karşılık
	Musluk Kelepçe
	Bayonet Parçası
	Çekmece Kapak Sabitleme Parçası
	Profil Ayak
BULAŞIK MAKİNESİ	Küçük Metal Klips
	Büyük Metal Klips
	Buhar Sacı
	Sağ Sabitleyici Braket
	Sol Sabitleyici Braket
	Lower Door
ÇAMAŞIR MAKİNESİ	Metal Koruma Parçası
SOĞUTUCU	Dar Dış Kapı Kolu Parçası
	Geniş Dış Kapı Kolu Parçası
	Beyaz NSP
	Eski NSP
	Lotus NSP
	Yeni Zamaklı Nsp
	Eski Zamaklı Nsp
	Sol Üçgen Parçası
	Sağ Üçgen Parçası
	Sağ Üst Mentese Destek

Ürün Grubu	Malzeme Adı
SOĞUTUCU	Sol Üst Menteşe Destek
	Lotus Parçası- Sol
	Lotus Parçası- Sağ
BUZDOLABI	BM Takviye
	SD Takviye
	Kapatma Mekanizması-Sol
	Kapatma Mekanizması-Sağ
	BM Panel Bağlantı-Sağ
	BM Panel Bağlantı-Sol
	Yan Yana Bağlantı Desteği-Sol
	Yan Yana Bağlantı Desteği-Sağ
	Kablo Giriş Bağlantı Parçası
	Vida Takviye
	Panel Bağlantı-Sağ
	Panel Bağlantı-Sol
	Z Parçası
	Yan Sabitleme
	Oda Sabitleyici

4.3. Problemin Belirlenmesi ve Modelin Tanımlanması

Fabrika ortamında üretim planlama tarafında üretimin müşteri talebi üzerine kısa sürede ve işletme için de maksimum kâr ile üretilmesi amaçlanmaktadır. Piyasada rakiplerin de olduğu düşünülürse üretim planlama alanında yapılacak olan çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Genel doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

Model Değişkenleri:

- x_i = Ürünler için üç aylık üretim miktarı
 b_j = j. Makinenin üretim süresi (dk)
 c_i = Birim kâr (TL)
 s_i = Sac hammadde birim kullanım miktarı(kg)
 k_i = i ürünü için tamamlayıcı parça birim kullanımı(adet)
 u_i = Asgari talep miktarı(adet)
 a_i = Tamamlayıcı parçalar için sistemde açılan talep miktarı(adet)
 m_i = Ürünün makinede üretim süresi (dk)
 t_i = Montaj parçalar için üretim süresi (dk)
 ST = Sac için üç aylık sistemde açılan talep miktarı (kg)
 IK = İşgücü üç aylık çalışma süresi (dk)

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Maksimize } Z = \sum_{i=1}^{i=40} c_i x_i \quad i = (1, 2, 3, \dots, 40) \quad (12)$$

Kısıt Denklemleri:

$$\sum_{i=1}^{i=40} s_i x_i \leq ST \quad \forall i, \quad (\text{Sac Hammadde Kısıtı}) \quad (13)$$

$$\sum_{i=15}^{i=19} k_i x_i \leq a_i \quad i = (15, \dots, 19), \quad (\text{Tamamlayıcı Parça Kısıtı}) \quad (14)$$

$$x_i \geq u_i \quad \forall i, \quad (\text{Asgari Talep Miktarı}) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{i=40} m_i x_i \leq b_j \quad i = (1, 2, 3, \dots, 40) \quad j = (1, 2, 3, \dots, 16), \quad (\text{Makine Kısıtı}) \quad (16)$$

$$\sum_{i=15}^{i=19} t_i x_i \leq IK \quad i = (15, \dots, 19), \quad (\text{İşgücü Kısıtı}) \quad (17)$$

Negatif Olmama Koşulu:

$$\sum_{i=1}^{i=40} x_i \geq 0 \quad \forall i \quad (18)$$

4.4. Karar Değişkenlerinin Oluşturulması

Kâr maksimizasyonu amaçlanan modelde uygulamada kullanılan veriler işletmeye ait veriler olup modelde ürünlerin üç aylık üretim miktarları baz alınarak karar değişkenleri oluşturulmuştur. Oluşturulan kırk adet karar değişkenleri tanımları ve sembolleri aşağıdaki gibidir:

- x₁: Menteşe Karşılık Aylık Üretim Miktarı
- x₂: Musluk Kelepçe Aylık Üretim Miktarı
- x₃: Bayonet Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₄: Çekmece Kapak Aylık Üretim Miktarı
- x₅: Profil Ayak Aylık Üretim Miktarı
- x₆: Küçük Metal Klips Aylık Üretim Miktarı
- x₇: Büyük Metal Klips Aylık Üretim Miktarı
- x₈: Buhar Sacı Aylık Üretim Miktarı
- x₉: Sağ Sabitleyici Braket Aylık Üretim Miktarı
- x₁₀: Sol Sabitleyici Braket Aylık Üretim Miktarı
- x₁₁: Lower Door Aylık Üretim Miktarı
- x₁₂: Metal Koruma Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₁₃: Dar Dış Kapı Kolu Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₁₄: Geniş Dış Kapı Kolu Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₁₅: Beyaz NSP Aylık Üretim Miktarı
- x₁₆: Eski NSP Aylık Üretim Miktarı
- x₁₇: Lotus NSP Aylık Üretim Miktarı
- x₁₈: Yeni Zamaklı NSP Aylık Üretim Miktarı
- x₁₉: Eski Zamaklı NSP Aylık Üretim Miktarı
- x₂₀: Sol Üçgen Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₂₁: Sağ Üçgen Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₂₂: Sağ Üst Menteşe Destek Aylık Üretim Miktarı
- x₂₃: Sol Üst Menteşe Destek Aylık Üretim Miktarı
- x₂₄: Lotus Parçası- Sol Aylık Üretim Miktarı
- x₂₅: Lotus Parçası- Sağ Aylık Üretim Miktarı
- x₂₆: BM Takviye Aylık Üretim Miktarı
- x₂₇: SD Takviye Aylık Üretim Miktarı
- x₂₈: Kapatma Mekanizması-Sol Aylık Üretim Miktarı
- x₂₉: Kapatma Mekanizması-Sağ Aylık Üretim Miktarı
- x₃₀: BM Panel Bağlantı-Sağ Aylık Üretim Miktarı
- x₃₁: BM Panel Bağlantı-Sol Aylık Üretim Miktarı
- x₃₂: Yan Yana Bağlantı Desteği Sol Aylık Üretim Miktarı
- x₃₃: Yan Yana Bağlantı Desteği Sağ Aylık Üretim Miktarı
- x₃₄: Kablo Giriş Bağlantı Parçası Aylık Üretim Miktarı
- x₃₅: Vida Takviye Aylık Üretim Miktarı

- x_{36} : Panel Bağlantı-Sağ Aylık Üretim Miktarı
 x_{37} : Panel Bağlantı-Sol Aylık Üretim Miktarı
 x_{38} : Z Parçası Aylık Üretim Miktarı
 x_{39} : Yan Sabitleme Aylık Üretim Miktarı
 x_{40} : Oda Sabitleyici Aylık Üretim Miktarı

4.5. Amaç Fonksiyonunun Oluşturulması

Optimal planlamayı sağlamak için oluşturulan doğrusal programlama modelinde kâr maksimizasyonu amaçlanmaktadır. Öncelikli olarak birim kâr değerlerini elde etmek gerekmektedir. Bunun için üretilen ürünlerde kullanılan sac hammadde, parça, ambalaj kullanım adetleri ve birim fiyatları dikkate alınarak toplam birim maliyeti hesaplanmıştır. Ürünlerin üç aylık Ocak, Şubat ve Mart ayları satış fiyatından toplam birim maliyetlerinin çıkarılmasıyla her ürün için birim kâr elde edilerek amaç fonksiyonun kat sayıları oluşturulmuştur. Modeldeki amaç, işletmenin kârlılık oranını optimum düzeye çıkarmak olduğu için, maksimizasyon denklemi uygulanmıştır. Maliyet tabloları dikkate alındığında amaç denklemi şu şekilde yazılmaktadır:

$$\text{Maksimize } Z = 0.70x_1 + 0.08x_2 + 0.26x_3 + 0.08x_4 + 0.46x_5 + 0.78x_6 + 0.79x_7 + 1.59x_8 + 0.51x_9 + 0.51x_{10} + 0.38x_{11} + 0.08x_{12} + 0.02x_{13} + 0.04x_{14} + 1.36x_{15} + 1.42x_{16} + 0.51x_{17} + 12x_{18} + 0.08x_{19} + 1.91x_{20} + 1.91x_{21} + 0.38x_{22} + 0.38x_{23} + 0.38x_{24} + 0.38x_{25} + 2.28x_{26} + 3.05x_{27} + 5.50x_{28} + 5.03x_{29} + 1.08x_{30} + 1.08x_{31} + 0.76x_{32} + 0.59x_{33} + 0.13x_{34} + 1.28x_{35} + 1.11x_{36} + 1.11x_{37} + 0.01x_{38} + 0.73x_{39} + 2.67x_{40}$$

4.6. Kısıtların Oluşturulması

Sac Hammadde Kısıtı: Sac hammadde kısıtını belirlerken sac için açılan üç aylık talep miktarı göz önüne alınmıştır. Buna göre her ürünün kg başına birim kullanım miktarı gerekli karar değişkenleriyle çarpılarak üç aylık hammadde kullanımına ulaşılmıştır. Diğer aylar yaşanacak olan olası talep değişimleri nedeniyle sistemde üç aylık açılan talep miktarı 280.000 kg'dır. Bu değer kullanım adedi ve tedarikçi kapasitesi göz önüne alınarak belirlenmiştir. Buna göre sac hammadde kısıtı denklemi aşağıdaki gibidir:

$$0.36x_1 + 0.02x_2 + 0.06x_3 + 0.01x_4 + 0.07x_5 + 0.01x_6 + 0.01x_7 + 0.17x_8 + 0.02x_9 + 0.02x_{10} + 0.01x_{11} + 0.02x_{12} + 0.02x_{13} + 0.02x_{14} + 0.29x_{15} + 0.29x_{16} + 0.35x_{17} + 0.29x_{18} + 0.29x_{19} + 0.40x_{20} + 0.40x_{21} + 0.08x_{22} + 0.08x_{23} + 0.08x_{24} + 0.08x_{25} + 0.31x_{26} + 0.64x_{27} + 0.11x_{28} + 0.11x_{29} + 0.15x_{30} + 0.15x_{31} + 0.16x_{32} + 0.16x_{33} + 0.03x_{34} + 0.10x_{35} + 0.12x_{36} + 0.12x_{37} + 0.07x_{38} + 0.06x_{39} + 0.44x_{40} \leq 280000$$

Tamamlayıcı Parça Hammadde Kısıtı: Kısıtta sağ tarafa yazılan değerler tedarikçi kapasitesi nedeniyle sistemde tedarikçiye açılan maksimum adetlerdir. Modelde tamamlayıcı parça kullanılan ürünlerin karar değişkenleri gerekli kısıtların denklemlerine yazılmıştır. Montajı yapılan parçalar için her üründe bir adet kullanılan bu kısıtlar şu şekilde ifade edilmiştir:

Nsp ayarlı ayak kısıtı:	$x_{15} + x_{16} + x_{18} + x_{19} \leq 60000$
Menteşe yatağı kısıtı:	$x_{15} + x_{17} \leq 58000$
Plastik yataklama kısıtı:	$x_{16} \leq 4500$
Ayarlı ayak kısıtı:	$x_{17} \leq 15000$
Pim kısıtı:	$x_{17} \leq 10000$
Kilitli poşet kısıtı:	$x_{17} \leq 18000$
Nsp vidası kısıtı:	$x_{18} + x_{19} \leq 40000$
Esanjör kısıtı:	$x_{18} \leq 10000$
Würth vida kısıtı:	$x_{18} \leq 7000$
Yataklama pimi kısıtı:	$x_{18} + x_{19} \leq 50000$
Yeni zamak mesafe kısıtı:	$x_{18} \leq 35000$

$$\begin{aligned} \text{Bearing part kısıtı:} & \quad x_{18} + x_{19} \leq 62000 \\ \text{Mesafe parçası kısıtı:} & \quad x_{19} \leq 9500 \end{aligned}$$

Asgari Talep Kısıtı: Ürünlerin müşteriden gelen siparişlere göre üretimleri yapılmaktadır. Talepte büyük farklılıklar yaşanmamakla birlikte müşteri tarafından ürünler için talep edilen üç aylık asgari talep miktarları bulunmaktadır. İşletme müşteri taleplerini karşılayabilmek için bu adetlerde üretim yapması gerekmektedir. İncelenen kırk adet ürün için asgari talep miktarları aşağıdaki gibi olmaktadır:

Menteşe karşılık ürünü asgari talep kısıtı:	$x_1 \geq 11440$
Musluk kelepçe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_2 \geq 25000$
Bayonet ürünü asgari talep kısıtı:	$x_3 \geq 10200$
Çekmece kapak ürünü asgari talep kısıtı:	$x_4 \geq 15200$
Profil ayak ürünü asgari talep kısıtı:	$x_5 \geq 15200$
Küçük klips ürünü asgari talep kısıtı:	$x_6 \geq 158700$
Büyük klips ürünü asgari talep kısıtı:	$x_7 \geq 175500$
Buhar sacı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_8 \geq 32000$
Sağ braket ürünü asgari talep kısıtı:	$x_9 \geq 31200$
Sol braket ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{10} \geq 30300$
Lower door ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{11} \geq 112800$
Metal koruma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{12} \geq 70000$
Dar kapı kolu ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{13} \geq 52000$
Geniş kapı kolu ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{14} \geq 1000$
Beyaz Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{15} \geq 3800$
Eski Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{16} \geq 3000$
Lotus Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{17} \geq 7000$
Yeni zamaklı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{18} \geq 5000$
Eski zamaklı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{19} \geq 7200$
Sol üçgen ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{20} \geq 14160$
Sağ üçgen ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{21} \geq 11160$
Sağ üst menteşe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{22} \geq 9000$
Sol üst menteşe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{23} \geq 9000$
Sol lotus ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{24} \geq 1950$
Sağ lotus ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{25} \geq 1950$
BM takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{26} \geq 11232$
SD takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{27} \geq 11904$
Sol kapatma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{28} \geq 644$
Sağ kapatma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{29} \geq 506$
Sağ BM panel ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{30} \geq 3900$
Sol BM panel ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{31} \geq 3900$
Sol yanyana ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{32} \geq 11160$
Sağ yanyana ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{33} \geq 10800$
Kablo giriş ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{34} \geq 9750$
Vida takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{35} \geq 1700$
Sağ panel bağlantı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{36} \geq 20000$
Sol panel bağlantı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{37} \geq 20000$
Z parçası ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{38} \geq 20400$
Yan sabitleme ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{39} \geq 10200$
Oda sabitleme ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{40} \geq 28560$

Makine Kısıtı: Ürünlerin preshanede pres makinelerinde basıldığı düşünülerek 16 pres makinesi için gerekli veriler üretimden alınmıştır. Preste bulunan pres makinesinin nominal çalışma süresi

aylık 12960 dk/ay olmaktadır. Üç aylık sürede bir pres makinesinin nominal çalışma süresi 38880 dk olarak bulunmaktadır. İşletmeden alınan bilgilere göre makinelerin aylık planlı bakım süresi 30 dk/ay; 3 aylık planlı bakım süresi 80 dk'dır. Plansız bakım süresi olarak bilinen arıza süreleri de üç aylık işletme arıza verilerinden elde edilmiştir. Bir makine için çalışma süresi makinenin nominal çalışma süresinden planlı ve plansız bakım sürelerinin çıkarılması sonucunda sağ taraf kısıt değerleri bulunmuştur. Bulunan sağ taraf değerleri sonrasında makinede ürünlerin basılma süreleri karar değişkenleri ile çarpılarak makine kısıtı aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır:

$$\begin{aligned}
\text{Makine 14: } & 0.71x_8 \leq 38620 \\
\text{Makine 106: } & 0.55x_{30}+0.55x_{31}+0.55x_{36}+0.55x_{37} \leq 38560 \\
\text{Makine 107: } & 0.81x_8 \leq 38530 \\
\text{Makine 108: } & 0.42x_2+0.06x_{28}+0.06x_{29} \leq 38610 \\
\text{Makine 109: } & 0.04x_7 \leq 38600 \\
\text{Makine 142: } & 0.6x_8 \leq 38650 \\
\text{Makine 166: } & 0.8x_{20}+0.55x_{21} \leq 38650 \\
\text{Makine 177: } & 0.2x_3+0.1x_{35} \leq 38650 \\
\text{Makine 178: } & 0.25x_{30}+0.25x_{31}+0.1x_{32}+0.1x_{33}+0.32x_{36}+0.32x_{37}+0.4x_{40} \leq 38650 \\
\text{Makine 182: } & 0.21x_{12}+0.21x_{13}+0.21x_{14} \leq 38620 \\
\text{Makine 187: } & 0.02x_4+0.02x_5+0.01x_9+0.03x_{10}+0.03x_{11}+0.01x_{34}+0.1x_{38}+0.1x_{39} \leq 38590 \\
\text{Makine 188: } & 0.04x_6 \leq 38590 \\
\text{Makine 202: } & 0.75x_{40} \leq 38620 \\
\text{Makine 219: } & 0.23x_{26}+0.23x_{27} \leq 38650 \\
\text{Makine 221: } & 0.38x_{15}+0.38x_{16}+0.38x_{17}+0.38x_{18}+0.38x_{19} \leq 38530 \\
\text{Makine 258: } & 0.75x_1+0.75x_{22}+0.75x_{23}+0.75x_{24}+0.75x_{25} \leq 38590
\end{aligned}$$

İşgücü Kısıtı: Doğrudan preshanede basılıp sevke hazır haline gelen ürünler için işgücü kısıtı bulunmamaktadır. Çünkü preshane operatörü her ürün için tek kişi olması nedeniyle makine kısıtı bu ürünler için yeterlidir. Bu ürünlerin haricinde montaj adımı da bulunan beş ürün için işgücü kısıtı bulunmaktadır. Beş ürün de kendi içerisinde zamak hammaddesinin bulunması veya kilitli poşet adımının yer alması nedeniyle süre farklılıkları bulunmaktadır. Her bir ürün için birim başına üretim süresi kullanılarak katsayılar bulunmuştur. Preshane, dolaplama, dış açma, kaplama ve montaj adımları ile 15 kişi iş gücü için ayda 194400 dk bulunmaktadır. 3 aylık işgücü 583200 dk yapmaktadır. İşçilerin %80 verimlilikle çalıştığı düşünülürse sağ taraf değeri 466560 dk olarak bulunur. Buna göre montajı yapılan ürünler için kısıt denklemi aşağıdaki gibidir:

$$15x_{15}+15x_{16}+15x_{17}+20x_{18}+15x_{19} \leq 466560$$

Negatif Olmama Koşulu: Bilindiği üzere doğrusal programlama modelinde değişkenlerin negatif değer alamama mecburiyeti söz konusudur. Bu mecburiyetten dolayı modelde olması gereken en önemli denklem kırk farklı karar değeri için aşağıdaki gibi oluşturulmaktadır:

$$\sum_{i=1}^{i=40} x_i \geq 0 \quad i = (1, 2, \dots, 40)$$

4.7. Modelin Klasik ve Bulanık Doğrusal Programlama ile Çözülmesi

Modelin çözülmesinde doğrusal programlama yazılım sistemi olan Lingo 19.0 paket programı kullanılmıştır. Model öncelikle doğrusal programlama ile çözülmüş ardından bulanık doğrusal programlamanın bir yöntemi olan verdegay yaklaşımı uygulanmıştır. Çözümlenen modelde öncelikle amaç fonksiyonu denklemi yazılmış ardından kısıtlara yer verilmiştir. İşletme kârını en çok etkileyen çeyrek bazlı üç dönem incelenmiştir. Fabrika için kurulan modelin Lingo

programında çözüm sonucuna göre amaç fonksiyonu 6923810 TL olarak bulunmuştur. Matematiksel modelin karar değişkenleri için çözüm sonucu aşağıdaki Tablo 2’te yer almaktadır:

Tablo 2. Lingo Çözüm Çıktısı

Karar Değişkeni	Lingo Çözüm Sonucu	Fırsat Maliyetler
X ₁	11440.00	0.000000
X ₂	25000.00	0.000000
X ₃	10200.00	0.000000
X ₄	15200.00	0.000000
X ₅	15200.00	0.000000
X ₆	964750.0	0.000000
X ₇	965000.0	0.000000
X ₈	47567.90	0.000000
X ₉	3053150.	0.000000
X ₁₀	30300.00	0.000000
X ₁₁	112800.0	0.000000
X ₁₂	70000.00	0.000000
X ₁₃	52000.00	0.000000
X ₁₄	1000.000	0.000000
X ₁₅	3800.000	0.000000
X ₁₆	3000.000	0.000000
X ₁₇	7000.000	0.000000
X ₁₈	7000.000	0.000000
X ₁₉	7200.000	0.000000
X ₂₀	14160.00	0.000000
X ₂₁	11160.00	0.000000
X ₂₂	9000.000	0.000000
X ₂₃	9000.000	0.000000
X ₂₄	1950.000	0.000000
X ₂₅	1950.000	0.000000
X ₂₆	121514.2	0.000000
X ₂₇	11904.00	0.000000
X ₂₈	467994.0	0.000000
X ₂₉	506.0000	0.000000
X ₃₀	3900.000	0.000000
X ₃₁	3900.000	0.000000
X ₃₂	11160.00	0.000000
X ₃₃	10800.00	0.000000
X ₃₄	9750.000	0.000000
X ₃₅	366100.0	0.000000
X ₃₆	20000.00	0.000000
X ₃₇	42309.09	0.000000
X ₃₈	20400.00	0.000000
X ₃₉	10200.00	0.000000
X ₄₀	28560.00	0.000000

Tablodaki bulunan çözüm modelin karar değişkenlerinin çözümde optimal sonuca ulaşmak için ürünlerden üretilmesi gereken adetlerdir. Buna göre x₁ için 11440, x₂ için 25000, x₃ için 10200, x₄ için 15200, x₅ için 15200, x₆ için 964750, x₇ için 965000, x₈ için 47567.90, x₉ için 3053150, x₁₀ için

30300, x_{11} için 112800, x_{12} için 70000, x_{13} için 52000, x_{14} için 1000, x_{15} için 3800, x_{16} için 3000, x_{17} için 7000, x_{18} için 7000, x_{19} için 7200, x_{20} için 14160, x_{21} için 11160, x_{22} için 9000, x_{23} için 9000, x_{24} için 1950, x_{25} için 1950, x_{26} için 121514.2, x_{27} için 11904, x_{28} için 467994, x_{29} için 506, x_{30} için 3900, x_{31} için 3900, x_{32} için 11160, x_{33} için 10800, x_{34} için 9750, x_{35} için 366100, x_{36} için 20000, x_{37} için 42309.09, x_{38} için 20400, x_{39} için 10200, x_{40} 28560 için adet olarak üretim yapılırsa maksimum kâr elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Lingo çıktısındaki birinci bölümde yer alan **fırsat maliyeti** bölümü karar değişkenleri için sıfırdır. Tüm değişkenlerin bir değeri olduğu düşünülürse sıfır olmaları gerekmektedir.

Model öncesinde işletmeden alınan bilgilere göre ürünler için hesaplanan kâr değeri işletmede 5963003 TL olarak hesaplandığı görülmüştür. Önerilen model sonucunda kâr değeri 6923810 TL olarak bulunmuştur. Önerilen model ile 960807 TL kâr elde edildiği görülmüştür.

Tablo 3'te yer alan rapor sonucu ikinci bölüme baktığımızda 71 kısıtın yer aldığı modelde ilk satır amaç fonksiyonu değeri olmak üzere kısıtların **aylak değişken** ve **gölge fiyatları** yer almaktadır. Aylak değişken değeri sıfır olan kısıtlar tam kapasite kullanılırken, herhangi bir değer yer alıyorsa kaynak miktarının fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bir birim değişiklik yapıldığında bu değişimin amaç fonksiyonu değerine birim etkisi gölge fiyatı kadar olacaktır. Buna göre aylak değişken değeri olan tamamlayıcı parçalar, küçük klips, büyük klips, buhar sacı, sağ braket, yeni zamaklı, bm takviye, sol kapatma, vida takviye, sol panel bağlantı ürünlerinden ve makinelerden 14, 142, 166, 178, 182, 202, 219, 221 ve 258 kısıtlarının fazla miktarda kapasite kaldığı görülmektedir. Ürünler için düşünülürse de fazla kapasitenin olması olası fazla talep halinde o ürünlerin üretilebileceği anlamına gelmektedir. Makineler içinse fazla kapasite istenmeyen bir durumdur.

Tablo 3. Aylak Değişken ve Gölge Fiyatı Çıktısı

Sıra	Aylak Değişkenler	Gölge Fiyatları
1	6923810.	1.000.000
SACKISITI	0.000000	7.354839
TAMAMLAYICIPARCA1	39000.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA2	47200.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA3	1500.000	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA4	8000.000	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA5	3000.000	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA6	11000.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA7	25800.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA8	3000.000	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA9	0.000000	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA10	35800.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA11	28000.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA12	47800.00	0.000000
TAMAMLAYICIPARCA13	2300.000	0.000000
MENTESEKARSILIK	0.000000	-1.947742
MUSLUKKELEPCE	0.000000	-32.90387
BAYONET	0.000000	-1.270323
CEKMECEKAPAK	0.000000	-0.7193548
PROFILYAK	0.000000	-0.7806452
KUCUKKLIPS	806050.0	0.000000
BUYUKKLIPS	789500.0	0.000000

Sıra	Aylak Değişkenler	Gölge Fiyatları
BUHARSACI	15567.90	0.000000
SAGBRAKET	3021950.	0.000000
SOLBRAKET	0.000000	-0.7258065
LOWERDOOR	0.000000	-0.7822581
METALKORUMA	0.000000	-0.6709677E-01
DARKAPIKOLU	0.000000	-0.1270968
GENISKAPIKOLU	0.000000	-0.1070968
BEYAZNSP	0.000000	-13.10677
ESKINSP	0.000000	-13.04677
LOTUSNSP	0.000000	-22.62065
YENIZAMAKLI	2000.000	0.000000
ESKIZAMAKLI	0.000000	-14.38677
SOLUCGEN	0.000000	-1.031.935
SAGUCGEN	0.000000	-1.031.935
SAGUSTMENTESE	0.000000	-0.2083871
SOLUSTMENTESE	0.000000	-0.2083871
SOLLOTUS	0.000000	-0.2083871
SAGLOTUS	0.000000	-0.2083871
BMTAKVIYE	110282.2	0.000000
SDTAKVIYE	0.000000	-1.657097
SOLKAPATMA	467350.0	0.000000
SAGKAPATMA	0.000000	-0.4700000
SAGBMPANEL	0.000000	-0.2506452
SOLBMPANEL	0.000000	-0.2506452
SOLYANYANA	0.000000	-0.4167742
SAGYANYANA	0.000000	-0.5867742
KABLOGIRIS	0.000000	-0.4535484
VIDATAKVIYE	364400.0	0.000000
SAGPANELBAGLANTI	0.000000	0.000000
SOLPANELBAGLANTI	22309.09	0.000000
ZPARCASI	0.000000	-4.133871
YANSABITLEME	0.000000	-3.340323
ODASABITLEME	0.000000	-0.5661290
MAKINE14	4846.790	0.000000
MAKINE106	0.000000	0.4134897
MAKINE107	0.000000	0.4193548
MAKINE108	0.000000	78.18280
MAKINE109	0.000000	17.91129
MAKINE142	10109.26	0.000000
MAKINE166	21184.00	0.000000
MAKINE177	0.000000	5.445161
MAKINE178	3141.091	0.000000
MAKINE182	12790.00	0.000000
MAKINE187	0.000000	36.29032
MAKINE188	0.000000	17.66129
MAKINE202	17200.00	0.000000
MAKINE219	7963.811	0.000000
MAKINE221	27890.00	0.000000
MAKINE258	13585.00	0.000000

Sıra	Aylak Değişkenler	Gölge Fiyatları
ISCILIK	11560.00	0.000000

Gerçek hayat problemlerinde talep verileri kullanılan gibi kesin olmamaktadır. Bu nedenle çalışmadaki talep verileri bulanık kabul edilip Verdegay yaklaşımı ile de çözümlenmiştir. Burada amaç fonksiyonu, sac hammadde kısıtı, tamamlayıcı parça kısıtı, makine kısıtı ve işçilik kısıtı bulanık değildir. Bu ifadelerin formülleri klasik doğrusal programlama ile aynıdır. Talep değerlerinin sağ taraf sabiti için %10 tolerans verilmiştir. BDP modelini $\theta = 1-\alpha$ olacak şekilde aşağıdaki gibi parametrik doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur.

Menteşe karşılık ürünü asgari talep kısıtı:	$x_1 \geq 11440 + 1144(1-\alpha)$
Musluk kelepçe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_2 \geq 25000 + 2500(1-\alpha)$
Bayonet ürünü asgari talep kısıtı:	$x_3 \geq 10200 + 1020(1-\alpha)$
Çekmece kapak ürünü asgari talep kısıtı:	$x_4 \geq 15200 + 1520(1-\alpha)$
Profil ayak ürünü asgari talep kısıtı:	$x_5 \geq 15200 + 1520(1-\alpha)$
Küçük klips ürünü asgari talep kısıtı:	$x_6 \geq 158700 + 15870(1-\alpha)$
Büyük klips ürünü asgari talep kısıtı:	$x_7 \geq 175500 + 17550(1-\alpha)$
Buhar sacı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_8 \geq 32000 + 3200(1-\alpha)$
Sağ braket ürünü asgari talep kısıtı:	$x_9 \geq 31200 + 3120(1-\alpha)$
Sol braket ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{10} \geq 30300 + 3030(1-\alpha)$
Lower door ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{11} \geq 112800 + 11280(1-\alpha)$
Metal koruma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{12} \geq 70000 + 7000(1-\alpha)$
Dar kapı kolu ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{13} \geq 52000 + 5200(1-\alpha)$
Geniş kapı kolu ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{14} \geq 1000 + 100(1-\alpha)$
Beyaz Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{15} \geq 3800 + 380(1-\alpha)$
Eski Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{16} \geq 3000 + 300(1-\alpha)$
Lotus Nsp ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{17} \geq 7000 + 700(1-\alpha)$
Yeni zamaklı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{18} \geq 5000 + 500(1-\alpha)$
Eski zamaklı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{19} \geq 7200 + 720(1-\alpha)$
Sol üçgen ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{20} \geq 14160 + 1416(1-\alpha)$
Sağ üçgen ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{21} \geq 11160 + 1116(1-\alpha)$
Sağ üst menteşe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{22} \geq 9000 + 900(1-\alpha)$
Sol üst menteşe ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{23} \geq 9000 + 900(1-\alpha)$
Sol lotus ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{24} \geq 1950 + 195(1-\alpha)$
Sağ lotus ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{25} \geq 1950 + 195(1-\alpha)$
BM takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{26} \geq 11232 + 1123(1-\alpha)$
SD takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{27} \geq 11904 + 1190(1-\alpha)$
Sol kapatma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{28} \geq 644 + 64(1-\alpha)$
Sağ kapatma ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{29} \geq 506 + 51(1-\alpha)$
Sağ BM panel ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{30} \geq 3900 + 390(1-\alpha)$
Sol BM panel ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{31} \geq 3900 + 390(1-\alpha)$
Sol yanyana ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{32} \geq 11160 + 1116(1-\alpha)$
Sağ yanyana ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{33} \geq 10800 + 1080(1-\alpha)$
Kablo giriş ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{34} \geq 9750 + 975(1-\alpha)$
Vida takviye ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{35} \geq 1700 + 170(1-\alpha)$
Sağ panel bağlantı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{36} \geq 20000 + 2000(1-\alpha)$
Sol panel bağlantı ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{37} \geq 20000 + 2000(1-\alpha)$
Z parçası ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{38} \geq 20400 + 2040(1-\alpha)$
Yan sabitleme ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{39} \geq 10200 + 1020(1-\alpha)$
Oda sabitleme ürünü asgari talep kısıtı:	$x_{40} \geq 28560 + 2856(1-\alpha)$
$x_1, x_2, \dots, x_{40} \geq 0$	
$\alpha \in [0,1]$	

Buna göre model Verdegay yaklaşımı ile Lingo paket programı ile çözümlenerek aşağıdaki tablodaki sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre kâr değerinin artması, memnuniyet derecesinin (α) de artması anlamına gelmektedir. Başka bir deyişle kısıtlardan sapmama derecesi (α) arttığında kârlılık da artacak, o derece memnuniyet derecesi de artacaktır.

Çözümünden çıkarılacak başka bir sonuç, α değerinin 1'e eşit olduğu durumda model deterministik modele eşitken; α değeri 0 değerine yaklaşması modeldeki bulanıklığı arttırmaktadır. Buna göre α 'nın 1 olduğu durumda sonuç 6923810 bulunmuş; α 'nın 0 olduğu durumda sonuç 6790055 olarak bulunmuştur. Gerçek hayat problemlerinde talepte yaşanacak olası değişimler için bulanık doğrusal programlama yöntemi daha çok önem kazanmaktadır. Buna göre Verdegay yaklaşımı ile bulunan sonuçlar Tablo 4'te görülmektedir.

Tablo 4. Verdegay Yaklaşımı Sonuç Tablosu

α	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Z	6790055.	6886634.	6817947.	6831893.	6845838.	6859721.	6873730.	6886634.	6899027.	6911417.	6923810.
X ₁	12584.00	11783.00	12355.00	12241.00	12126.00	12012.00	11898.00	11783.00	11669.00	11554.00	11440.00
X ₂	27500.00	25750.00	27000.00	26750.00	26500.00	26250.00	26000.00	25750.00	25500.00	25250.00	25000.00
X ₃	11220.00	10506.00	11016.00	10914.00	10812.00	10710.00	10608.00	10506.00	10404.00	10302.00	10200.00
X ₄	16720.00	15656.00	16416.00	16264.00	16112.00	15960.00	15808.00	15656.00	15504.00	15352.00	15200.00
X ₅	16720.00	15656.00	16416.00	16264.00	16112.00	15960.00	15808.00	15656.00	15504.00	15352.00	15200.00
X ₆	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0	964750.0
X ₇	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0	965000.0
X ₈	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90	47567.90
X ₉	2972565.	3028974.	2988682.	2996740.	3004799.	3012857.	3020916.	3028974.	3037033.	3045091.	3053150.
X ₁₀	33330.00	31209.00	32724.00	32421.00	32118.00	31815.00	31512.00	31209.00	30906.00	30603.00	30300.00
X ₁₁	124080.0	116184.0	121824.0	120696.0	119568.0	118440.0	117312.0	116184.0	115056.0	113928.0	112800.0
X ₁₂	77000.00	72100.00	75600.00	74900.00	74200.00	73500.00	72800.00	72100.00	71400.00	70700.00	70000.00
X ₁₃	57200.00	53560.00	56160.00	55640.00	55120.00	54600.00	54080.00	53560.00	53040.00	52520.00	52000.00
X ₁₄	1.100.000	1.030.000	1.080.000	1.070.000	1.060.000	1.050.000	1.040.000	1.030.000	1.020.000	1.010.000	1.000.000
X ₁₅	4.180.000	3.914.000	4.104.000	4.066.000	4.028.000	3.990.000	3.952.000	3.914.000	3.876.000	3.838.000	3.800.000
X ₁₆	3.300.000	3.090.000	3.240.000	3.210.000	3.180.000	3.150.000	3.120.000	3.090.000	3.060.000	3.030.000	3.000.000
X ₁₇	7.700.000	7.210.000	7.560.000	7.490.000	7.420.000	7.350.000	7.280.000	7.210.000	7.140.000	7.070.000	7.000.000
X ₁₈	6.003.000	7.000.000	6.318.000	6.475.500	6.633.000	6.790.500	6.948.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000	7.000.000
X ₁₉	7.920.000	7.416.000	7.776.000	7.704.000	7.632.000	7.560.000	7.488.000	7.416.000	7.344.000	7.272.000	7.200.000
X ₂₀	15576.00	14585.00	15293.00	15151.00	15010.00	14868.00	14726.00	14585.00	14443.00	14302.00	14160.00
X ₂₁	12276.00	11495.00	12053.00	11941.00	11830.00	11718.00	11606.00	11495.00	11383.00	11272.00	11160.00
X ₂₂	9.900.000	9.270.000	9.720.000	9.630.000	9.540.000	9.450.000	9.360.000	9.270.000	9.180.000	9.090.000	9.000.000
X ₂₃	9.900.000	9.270.000	9.720.000	9.630.000	9.540.000	9.750.000	9.360.000	9.270.000	9.180.000	9.090.000	9.000.000
X ₂₄	2.145.000	2.009.000	2.106.000	2.087.000	2.067.000	2.048.000	2.028.000	2.009.000	1.989.000	1.970.000	1.950.000
X ₂₅	2.145.000	2.009.000	2.106.000	2.087.000	2.067.000	2.048.000	2.028.000	2.009.000	1.989.000	1.970.000	1.950.000
X ₂₆	116677.2	119782.4	117535.8	117966.5	118394.4	118747.7	119256.3	119782.4	120361.0	120935.6	121514.2
X ₂₇	13094.00	12261.00	12856.00	12737.00	12618.00	12499.00	12380.00	12261.00	12142.00	12023.00	11904.00
X ₂₈	450443.0	462729.0	453954.0	455709.0	457464.0	459219.0	460974.0	462729.0	464484.0	466239.0	467994.0
X ₂₉	5.570.000	5.210.000	5.460.000	5.410.000	5.360.000	5.310.000	5.260.000	5.210.000	5.160.000	5.110.000	5.060.000
X ₃₀	4.290.000	4.017.000	4.212.000	4.173.000	4.134.000	4.095.000	4.056.000	4.017.000	3.978.000	3.939.000	3.900.000
X ₃₁	4.290.000	4.017.000	4.212.000	4.173.000	4.134.000	4.095.000	4.056.000	4.017.000	3.978.000	3.939.000	3.900.000
X ₃₂	12276.00	11495.00	12053.00	11941.00	11830.00	11718.00	11606.00	11495.00	11383.00	11272.00	11160.00
X ₃₃	11880.00	11124.00	11664.00	11556.00	11448.00	11340.00	11232.00	11124.00	11016.00	10908.00	10800.00
X ₃₄	10725.00	10043.00	10530.00	10433.00	10335.00	10238.00	10140.00	10043.00	9945000	9848000	9750000
X ₃₅	364060.0	365488.0	364468.0	364672.0	364876.0	365080.0	365284.0	365488.0	365692.0	365896.0	366100.0

x ₃₆	22000.00	20600.00	21600.00	21400.00	21200.00	21000.00	20800.00	20600.00	20400.00	20200.00	20000.00
x ₃₇	39529.09	41475.09	40085.09	40363.09	40641.09	40919.09	41197.09	41475.09	41753.09	42031.09	42309.09
x ₃₈	22440.00	21012.00	22032.00	21828.00	21624.00	21420.00	21216.00	21012.00	20808.00	20604.00	20400.00
x ₃₉	11220.00	10506.00	11016.00	10914.00	10812.00	10710.00	10608.00	10506.00	10404.00	10302.00	10200.00
x ₄₀	31416.00	29417.00	30845.00	30559.00	30274.00	29988.00	29702.00	29417.00	29131.00	28846.00	28560.00

4.8. Duyarlılık Analizi

Lingo çıktısında raporun üçünü kısmında duyarlılık analizi yapılmıştır. Duyarlılık analizinde doğrusal programlamada ve bulanık doğrusal programlamada katsayı değişmesinin problemin çözümü üzerine etkisini ve çözüme girmeyen karar değişkenlerinin de katsayı aralıklarını bulmak amaçlanır. Her iki çıktı sonuçlarında uygun artış ve azalış aralıkları görülmektedir. Katsayı aralıkları için değer aşağıdaki aralık ifadesinde olmalıdır:

$$(\text{Mevcut katsayı} - \text{Uygun azalma}, \text{Mevcut katsayı} + \text{Uygun artış}) \quad (19)$$

Bunu menteşe karşılık üretim adedi (x_1) için düşünürsek $(0.7000\text{-INFINITY}, 0.7000+1.947742) = (-\infty, 2.64774)$ olarak bulunur. Katsayı bu aralıklar içerisinde yer aldığı sürece optimal değer korunacaktır. Aynı şekilde diğer karar değişkenleri için yapıldığında x_3 için $(-\infty, 1.533)$, x_4 için $(-\infty, 1.5193)$, x_5 için $(-\infty, 1.2406)$, x_6 için $(0.073, \infty)$, x_8 için $(1.2504, \infty)$, x_{11} için $(-\infty, 1.16)$, x_{12} için $(-\infty, 1.47)$, x_{13} için $(-\infty, 0.327)$, x_{30} için $(-\infty, 1.33)$, x_{31} için $(-\infty, 1.33)$, x_{34} için $(-\infty, 0.583)$, x_{35} için $(1.824, \infty)$, x_{37} için $(1.11, \infty)$, x_{38} için $(-\infty, 4.233)$, x_{40} için $(-\infty, 3.236)$ aralığında olduğu sürece optimal çözüm sonucu aynı kalacaktır.

Tablo 5. Değişken Katsayısı Aralıkları

Değişken	Mevcut Değer	Artırılabilir Değer	Azaltılabilir Değer
X1	0.7000000	1.947742	INFINITY
X2	0.8000000E-01	32.90387	INFINITY
X3	0.2600000	1.270323	INFINITY
X4	0.8000000E-01	0.7193548	INFINITY
X5	0.4600000	0.7806452	INFINITY
X6	0.7800000	INFINITY	0.7064516
X7	0.7900000	INFINITY	0.7164516
X8	1.590000	INFINITY	0.3396774
X9	0.5100000	INFINITY	0.2419355
X10	0.5100000	0.7258065	INFINITY
X11	0.3800000	0.7822581	INFINITY
X12	0.8000000E-01	0.6709677E-01	INFINITY
X13	0.2000000E-01	0.1270968	INFINITY
X14	0.4000000E-01	0.1070968	INFINITY
X15	1.360000	13.10677	INFINITY
X16	1.420000	13.04677	INFINITY
X17	0.5100000	22.62065	INFINITY
X18	12.00000	INFINITY	9.867.097
X19	0.8000000E-01	14.38677	INFINITY
X20	1.910000	1.031935	INFINITY
X21	1.910000	1.031935	INFINITY
X22	0.3800000	0.2083871	INFINITY
X23	0.3800000	0.2083871	INFINITY
X24	0.3800000	0.2083871	INFINITY

Değişken	Mevcut Değer	Artırılabilir Değer	Azaltılabilir Değer
X25	0.3800000	0.2083871	INFINITY
X26	2.280000	0.5875000	0.3988636
X27	3.050000	1.657097	INFINITY
X28	5.500000	INFINITY	0.4700000
X29	5.030000	0.4700000	INFINITY
X30	1.080000	0.2506452	INFINITY
X31	1.080000	0.2506452	INFINITY
X32	0.7600000	0.4167742	INFINITY
X33	0.5900000	0.5867742	INFINITY
X34	0.1300000	0.4535484	INFINITY
X35	1.280.000	INFINITY	0.5445161
X36	1.110000	0.000000	INFINITY
X37	1.110000	INFINITY	0.000000
X38	0.1000000E-01	4.133871	INFINITY
X39	0.7300000	3.340323	INFINITY
X40	2.670000	0.5661290	INFINITY

Duyarlılık analizinde sağ taraf sabitleri için de optimal çözüm aralıkları bulunmaktadır. Buna göre, mevcut sağ taraf-uygun azalmalar, mevcut sağ taraf + uygun artışlar denkleminde uygun optimal çözüm aralıkları bulunmaktadır. Sac hammadde kısıtı için (245753, 290674) aralığında optimal çözüm aynı kalacaktır.

Tablo 6. Sağ Taraf Değer Aralığı

Satır	Mevcut Sağ Taraf Değeri	Artırılabilir Değer	Azaltılabilir Değer
SACKISITI	280000.0	10674.87	34246.45
TAMAMLAYICIPARCA1	60000.00	INFINITY	39203.33
TAMAMLAYICIPARCA2	58000.00	INFINITY	47200.00
TAMAMLAYICIPARCA3	4500.000	INFINITY	1500.000
TAMAMLAYICIPARCA4	15000.00	INFINITY	8000.000
TAMAMLAYICIPARCA5	10000.00	INFINITY	3000.000
TAMAMLAYICIPARCA6	18000.00	INFINITY	11000.00
TAMAMLAYICIPARCA7	40000.00	INFINITY	26003.33
TAMAMLAYICIPARCA8	10000.00	INFINITY	3203.333
TAMAMLAYICIPARCA9	7000.000	INFINITY	203.3333
TAMAMLAYICIPARCA10	50000.00	INFINITY	36003.33
TAMAMLAYICIPARCA11	35000.00	INFINITY	28203.33
TAMAMLAYICIPARCA12	62000.00	INFINITY	48003.33
TAMAMLAYICIPARCA13	9500.000	INFINITY	2300.000
MENTESEKARSILIK	11440.00	18113.33	11440.00
MUSLUKKELEPCE	25000.00	14233.15	25000.00
BAYONET	10200.00	76249.04	10200.00
CEKMECEKAPAK	15200.00	355828.9	15200.00
PROFILAYAK	15200.00	1139583.	15200.00
KUCUKKLIPS	158700.0	806050.0	INFINITY
BUYUKKLIPS	175500.0	789500.0	INFINITY
BUHARSACI	32000.00	15567.90	INFINITY
SAGBRAKET	31200.00	3021950.	INFINITY

Satır	Mevcut Sağ Taraflı Değeri	Artırılabilir Değer	Azaltılabilir Değer
SOLBRAKET	30300.00	268345.8	30300.00
LOWERDOOR	112800.0	214676.6	112800.0
METALKORUMA	70000.00	60904.76	70000.00
DARKAPIKOLU	52000.00	60904.76	52000.00
GENISKAPIKOLU	1000.000	60904.76	1000.000
BEYAZNSP	3800.000	770.6667	3800.000
ESKINSP	3000.000	770.6667	3000.000
LOTUSNSP	7000.000	770.6667	7000.000
YENIZAMAKLI	5000.000	2000.000	INFINITY
ESKIZAMAKLI	7200.000	770.6667	7200.000
SOLUCGEN	14160.00	26480.00	14160.00
SAGUCGEN	11160.00	38516.36	11160.00
SAGUSTMENTESE	9000.000	18113.33	9000.000
SOLUSTMENTESE	9000.000	18113.33	9000.000
SOLLOTUS	1950.000	18113.33	1950.000
SAGLOTUS	1950.000	18113.33	1950.000
BMTAKVIYE	11232.00	110472.4	INFINITY
SDTAKVIYE	11904.00	53417.95	11904.00
SOLKAPATMA	644.0000	467350.0	INFINITY
SAGKAPATMA	506.0000	467350.0	506.0000
SAGBMPANEL	3900.000	22309.09	3900.000
SOLBMPANEL	3900.000	22309.09	3900.000
SOLYANYANA	11160.00	31410.91	11160.00
SAGYANYANA	10800.00	31410.91	10800.00
KABLOGIRIS	9750.000	3021950.	9750.000
VIDATAKVIYE	1700.000	364400.0	INFINITY
SAGPANELBAGLANTI	20000.00	22309.09	20000.00
SOLPANELBAGLANTI	20000.00	22309.09	INFINITY
ZPARCASI	20400.00	82567.94	20400.00
YANSABITLEME	10200.00	76670.23	10200.00
ODASABITLEME	28560.00	7852.727	24395.07
MAKINE14	38620.00	INFINITY	4846.790
MAKINE106	38560.00	5398.750	12270.00
MAKINE107	38530.00	5529.437	12610.00
MAKINE108	38610.00	18647.72	5854.818
MAKINE109	38600.00	136749.9	31580.00
MAKINE142	38650.00	INFINITY	10109.26
MAKINE166	38650.00	INFINITY	21184.00
MAKINE177	38650.00	34187.49	10733.83
MAKINE178	38650.00	INFINITY	3141.091
MAKINE182	38620.00	INFINITY	12790.00
MAKINE187	38590.00	17093.74	5366.916
MAKINE188	38590.00	136749.9	32242.00
MAKINE202	38620.00	INFINITY	17200.00
MAKINE219	38650.00	INFINITY	7963.811
MAKINE221	38530.00	INFINITY	27890.00
MAKINE258	38590.00	INFINITY	13585.00
ISCILIK	466560.0	INFINITY	11560.00

Uygulamada buraya kadar karar değişkenlerinin çözüm sonuçları, optimal çözüm için kullanılan karar değişkenleri, fırsat maliyetler, çözümde yer alan kısıtlar ve aylak değişkenleri aynı zamanda gölge fiyatları bulunmuştur. Çözümde yer alan değişkenler ve kısıtlar için duyarlılık analizi incelemesi yapılmış ve bunun sonucunda uygun artışlar ve azalışlara göre değişkenlerin ve kısıtların alması gereken değerler incelenmiştir.

Çözüm sonucunda makinelerde boş kalan ve kullanılmayan kapasitelerin olduğu görülmüştür. Bu boş kalan makine kapasiteleri için farklı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerin başında boş kalan makinelerin kiralanması önerilebilir. Başka bir öneri ise, bu makinelerde sipariş listesine eklenecek yeni ürün gruplarının üretimini yapılmasıdır. Öngörülen 3 adet ürün (New Cover sağ-sol ve Ruba zamaklı NSP) modele eklenerek tekrar çözümlenmiştir. Ruba zamaklı (x_{41}) 32,68 TL/br, New Cover Sağ (x_{42}) ve New Cover Sol (x_{43}) 0,85 TL/br kâr ile hesaplanmıştır. Ruba zamaklı ürün için asgari talep kısıtına 8000 adet, New cover ürünleri için 3500 adet eklenmiştir. Ruba zamaklı ürünü montajlı bir parça olması nedeniyle tamamlayıcı parça kısıtlarına (ayarlı ayak kısıtı, nsp vidası kısıtı, yataklama pimi kısıtı, bearing part kısıtı ve ruba zamak kısıtı) olarak eklenmiştir. Eklenen bu üç ürün makine 221 ve makine 258 makinelerde basılabilir olması nedeniyle makine kısıtlarına da eklenmiştir. Ruba zamak iş gücü kısıtlarına da ekleme yapılmıştır. Çözüm sonucunda optimal değer 7297054 TL olarak bulunmuştur. Makine 221 tam kapasite kullanılırken; makine 258 için 16178.44 birimlik boş kapasitesi kalmıştır. Bir önceki modele göre boş kapasitelerde iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde üretimin olduğu işletmelerde üretim planlaması işletmenin vazgeçilmez bir parçasıdır. Sahip olunan kaynakların doğru şekilde yönetilmesi ve planlanması başlı başına bir iştir. Üretim planlama malzeme, işgücü, ekipman gibi kaynakların müşteri talepleri ve teslimat süresine uygun olarak doğru kullanımı ile işletmenin kâr elde etmesini sağlar. Üretim planlaması, işletmenin iş planlamasının önemli bir parçası olduğu kadar işletmenin üretim yönetimini güçlü bir şekilde destekleyen yeri doldurulamaz bir bütündür. Doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama, aynı zamanda üretim planlama problemine yönelik önemli bir yönelem araştırmasının en gelişmiş yöntemleridir. Kaynakların en etkin kullanımını sağlaması ve optimal çözüme hızlı ulaşılması bakımından bu çalışmada üretim planlama probleminde çözüm önce doğrusal programlama ile çözülmüş ardından gerçek hayat problemlerinde doğru sonuçlara ulaşılmasını sağlayan bulanık doğrusal programlama ile sonuç bulunmuştur.

İncelenen bu makale çalışmasında metal sektöründe faaliyet gösteren bir fabrikada kâr maksimizasyonu sağlayan planlama modeli oluşturulmuştur. Model çeyrek bazda Ocak, Şubat ve Mart ayındaki işletme verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Seçilen bu üç aylık periyot ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle maksimum kâr sağlayan amaç fonksiyonu oluşturulmuş sonrasında sac hammadde kısıtı, tamamlayıcı parça kısıtı, asgari talep kısıtı, makine ve işgücü kısıtları da modele eklenmiştir. Çözüm doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama ile de yapılmıştır. Gerçek hayatta talep belirsizliklerin de olabileceği düşünerek çözümde esnek bir model olan bulanık doğrusal programlama tercih edilmektedir. Klasik doğrusal programlama modeline kıyasla bulanık doğrusal programlama modeli çok daha bilgi ve gerçek hayata yakınlığı sebebiyle daha anlamlı sonuçlar vermektedir diyebiliriz.

Uygulamanın yapıldığı işletmede kâr maksimizasyonunu sağlayan adetler sonuç olarak bulunmuştur. Buna göre x_1 için 11440, x_2 için 25000, x_3 için 10200, x_4 için 15200, x_5 için 15200, x_6 için 964750, x_7 için 965000, x_8 için 47567.90, x_9 için 3053150, x_{10} için 30300, x_{11} için 112800, x_{12} için 70000, x_{13} için 52000, x_{14} için 1000, x_{15} için 3800, x_{16} için 3000, x_{17} için 7000, x_{18} için 7000, x_{19} için 7200, x_{20} için 14160, x_{21} için 11160, x_{22} için 9000, x_{23} için 9000, x_{24} için 1950, x_{25} için 1950,

x_{26} için 121514.2, x_{27} için 11904, x_{28} için 467994, x_{29} için 506, x_{30} için 3900, x_{31} için 3900, x_{32} için 11160, x_{33} için 10800, x_{34} için 9750, x_{35} için 366100, x_{36} için 20000, x_{37} için 42309.09, x_{38} için 20400, x_{39} için 10200, x_{40} 28560 için adet olarak üretim yapılırsa maksimum kâr elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Çözüm sonucunda tamamlayıcı parçalar için açılan taleplerde ve işçilik için fazlalık olduğu görülmüştür. Fakat bu fazlalık bir sonraki aylarda olacak olası talep değişimlerine emniyet stoku ve kapasitesi şeklinde görülmektedir. Başka bir durum ise makinelerde boş kalan ve kullanılmayan kapasitelerin olduğu görülmüştür. Bu boş kalan makine kapasiteleri için farklı teoriler geliştirilmiştir. Bu teorilerin başında boş kalan makinelerin kiralanması önerilebilir. Başka bir öneri ise, bu makinelerde sipariş listesine eklenecek yeni ürün gruplarının üretiminin yapılmasıdır. Öngörülen 3 adet ürün (new cover sağ-sol ve ruba zamaklı nsp) modele eklenerek tekrar çözümlenmiştir. Ruba zamaklı ürün için asgari talep kısıtına 8000 adet, new cover ürünleri için 3500 adet eklenmiştir. Eklenen bu üç ürün makine 221 ve makine 258 makinelerde basılabilir olması nedeniyle makine kısıtlarına da eklenmiştir. Çözüm sonucunda optimal değer 7297054 TL olarak bulunmuştur. Makine 221 tam kapasite kullanılırken; makine 258 16178.44 birimlik boş kapasitesi kalmıştır. Bir önceki modele göre boş kapasitelerde iyileştirme gerçekleştirilmiştir.

Lingo yazılımı ile bulunan çözüm sonucuna göre maksimum kâr sağlayan amaç fonksiyonu değeri 6923810 TL olarak bulunmuştur. Model öncesinde işletmeden alınan bilgilere göre ürünler için hesaplanan kâr değeri işletmede 5963003 TL olarak hesaplandığı görülmüştür. Önerilen model ile 960807 TL kâr elde edildiği görülmüştür. Önerilen modelde makine kapasitesinin boş kaldığı görülmüştür. Bu sebeple boş kalan makinelere yeni ürünler eklenerek optimal değer 7297054 TL olarak bulunmuştur. Bu şekilde eski modele göre 373244 TL kâr artışı sağlanmıştır. Elde ettiğimiz kâr farkı makine kapasitesinde %39 oranında atıl kapasiteyi azaltmıştır.

Model gerçek hayatta yaşanabilecek talep belirsizlikleri nedeniyle bulanık doğrusal programının Verdegay yaklaşımı ile de çözümlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda modelin bulanıklığı en yüksek olduğu haliyle amaç fonksiyonu değeri 6790055 olarak bulunmuştur. Modelde bulanık doğrusal programlama ile gerçek hayatta yaşanabilecek belirsizliği daha doğru şekilde modellediği ve daha sağlıklı sonuçlar verdiği kanaatine varılmaktadır.

Sonuç olarak literatürde de farklı sektörlerde uygulama alanı bulunan üretim planlamada doğrusal programlama ve bulanık doğrusal programlama ile kâr maksimizasyonu modeli oluşturulmuştur. Karar problemleri için belirsizliği azaltmak ancak bulanık doğrusal programlama ile mümkündür. Her planlama probleminin kendi içerisinde farklı kaynakları ve kısıtları olsa da başka sektörlerde geliştirilen bu modeli uygulamak ve alternatif oluşturmak mümkündür.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Aboudhier, A. A. (2017). *A Linear Programming Model For Production Planning* [Yüksek lisans tezi]. Atılım University School of Social Sciences Department of Business Administration, Ankara.
- Aladağ, Z. (2011). Yöneylem Araştırması 1. *Umuttepe Kitabevi*, Kocaeli.
- Al-kuhali K, Zain Z.M. & Hussein M. I. (2012). Production Planning of LCDs: Optimal Linear Programming and Sensitivity Analysis. *Universiti Malaysia Perlis School of Manufacturing Engineering Letters*, 2(9), 1-10, 2224-6096.
- Almeida, E. S. Q. (2019). *Optimization of Aluminium Profiles Production Planning* [Yüksek lisans tezi]. School of Management and Technology, Portugal.
- Argoneto, P., Perrone, G., Renna, P., Lo Nigro, G., Bruccoleri, M. & Diega, S. (2008). Production Planning in Production Networks. *Springer*, Italy.
- Aydın, Z. (2006). *Doğrusal Programlamanın Üretim Planlaması Alanında Uygulanması* [Yüksek lisans tezi]. Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Bhunia A.K., Sahoo L. & Shaikh A.A (2019). Advanced optimization and operations research. *Springer*, USA.
- Çetindere, A., Sevim, Ş. & Duran, C. (2015). Üretim Planlama Problemlerinde Doğrusal Programlama Tekniğinin Kullanımı: Bir Konfeksiyon İşletmesinde Uygulama. *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 35, 271-300.
- Deste, M. & Karabulut, M. (2021). Doğrusal Programlama Tekniğiyle Üretim Planlama Yaklaşımı ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 26 (3), 247-258.
- Ekmekçi, N. (2015). *Sanayi İşletmelerinde Üretim Planlaması ve Doğrusal Programlama ile Bir Sanayi İşletmesinde Optimizasyon Uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya.
- Erdaş M. L. & Demir Y. D. (2016). Developing A portfolio optimization model by fuzzy linear programming. *The Journal of International Social Research*. 9(45), 768–789.
- Erfanian, M. & Pirayesh, M. (2016, December, 04-07), *Integration Aggregate Production Planning and Maintenance Using Mixed Integer Linear Programming*, 2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Indonesia. 927-930.
- Ergülen, A. & Büyükkeklik, M. (2014). İnşaat Sektöründeki Üretim Planlamasına Bir Model Önerisi: Doğrusal Programlama Uygulaması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(1), 55-71.
- Garg, A. (2011). Production and Operations Management. *The Tata McGraw Hill Education Private Limited*, New Delhi.

- Guo, X. (2020, February, 11-13). *A Study of Production Planning Based on the Linear Programming Method*, 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). UK. 90-95.
- Gupta, R.K. (2015). Operations Research. *Krishna Prakashan Media (P) Ltd*, Hindistan.
- Hillier, F.S. & Lieberman G.J. (2015). Introduction to operations research. *McGraw-Hill Education*, New York.
- Kaçtıoğlu, S. (2020). Yöneylem Araştırması 1. Ders Notları. *İstanbul Ticaret Üniversitesi*, İstanbul.
- Kaya, Ö. (2007). *Bulanık doğrusal programlama ve üretim planlama üzerine bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kempf, K.G., Keskinocak, P. & Uzsoy, R. (2011). Planning production and inventories in the extended enterprise. *Springer*, London.
- Kobu, B. (2010). Üretim Yönetimi. *Beta Yayıncılık*, İstanbul.
- Kumar, S.A. & Suresh N. (2009). Production and operations management. *New Age International Pvt Ltd Publishers*, New Delhi.
- Lai Y.J. & Hwang C.L. (1992). Fuzzy Mathematical Programming. *Springer Verlag*, Berlin.
- Maltepe, I. (2012). *Doğrusal programlama yardımıyla üretim planlamasının sanal bir petrol rafineri şirketine uygulanması* [Yüksek lisans tezi]. Karadeniz Teknik Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Trabzon.
- Maturana, S. & Pizani, E. (2009, Temmuz, 6-9). *Scheduling and production planning for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic*. 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering. France. 124-127.
- Men, B. H. & Yin, S. Y. (2018). Application of LINGO in water resources optimization teaching based on integer programming. *Creative Education*, 9, 2516-2524.
- Nasseri, S., Ebrahimnejad, A. & Cao, B. (2019). Fuzzy linear programming: Solution techniques and applications. *Springer*, Switzerland.
- Oğlak, Ö.T. (2018). *Doğrusal programlama yöntemi ile talep tahmini ve alüminyum sektöründe bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Paksoy, T., Pehlivan, N. & Özceylan, E. (2013). Bulanık Küme Teorisi. *Nobel Yayın*, Ankara.
- Sule, D. R. (2007). Production planning and industrial scheduling. *CRC Press*, London.
- Telsang, M.T. (2018). Industrial engineering and production management. *S. Chand Publishing*, India.
- Tuş, A. (2006). *Bulanık doğrusal programlama ve bir üretim planlamasında uygulama örneği* [Yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Denizli.

- Uzunkaya, K. & Gül, M. (2017). Dinar Karakuyu sulaması sahası tarımsal işletmelerinin doğrusal programlama yöntemi kullanılarak ürün desenlerinin planlanması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (2), 388-396.
- Ünüçok, S. (2019). *Doğrusal programlama yöntemi ile üretim planlama bir Nonwoven kumaş fabrikasında uygulama* [Yüksek lisans tezi]. Hasan Kalyoncu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gaziantep.
- Yakar, G. (2002). *Doğrusal programlama modellerine cebirsel modelleme yaklaşımı ve üretim planlamasına bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir.
- Yingfeng, W. & Dawei, W. (2011, September, 8-10). A mathematical programming model for optimization problem of production process based on time constraints in Pinggao Group Co. *2011 2nd IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences*, Beijing. 258-261.
- Yu Da, (2004). *Sensitivity analysis for production planning model of an oil company* [Yüksek lisans tezi]. Eötvös Loránd University Faculty of Natural Sciences. Budapest.
- Zongxiang, H. (2008, Kasım, 19-21). *Research for production scheduling of discrete manufacturing enterprise based on the theory of constraints*. 2008 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. Taiwan. 167-171.



Araştırma Makalesi / Research Article

DEĞER AKIŞI HARİTALAMA YÖNTEMİYLE OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE FAALİYET GÖSTEREN BİR FİRMANIN TESLİMAT SÜRESİNİN AZALTILMASI

REDUCING THE DELIVERY TIME OF A COMPANY OPERATING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY BY VALUE STREAM MAPPING METHOD

İrem DÜZDAR ARGUN¹

Senanur ÇELİK²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1252423>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
iremduzdar@duzce.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
17.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted
17.04.2023

Öz

Üretim kaynaklarının sınırlı olduğu ve işletme maliyetlerinin yüksek olduğu bir rekabet ortamında kullanılacak kaynakların planlaması ve müşteri memnuniyetini sağlayacak kalite, kullanılabilirlik, tasarım gibi faktörlerin düşük maliyet, yüksek karlılıkla üretilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda israflar ortadan kaldırılmak istenmektedir. Araştırmada amaç; Sistemi yalın üretim prensipleriyle bütün olarak inceleyip, müşteri talebine göre sıfır stok kavramıyla üretim yapmaktır. Bu çalışmada kullanılacak yöntem olan değer akışı haritalamanın temel amacı, israfları tespit etmek ve kaldırılması için gerekli adımları belirlemektir. Araştırma, yalın üretimi benimseyen otomotiv sanayiinde faaliyet gösteren otomobil koltuk kılıfı üreticisi Toyota Boshoku Sewtech Türkiye'nin yalınlaştırılması üzerine yapılmıştır. Araştırma sonucunda müşteri memnuniyetinin sağlanması, akış süresinin kısaltılması, israf kaynakların tespit edilmesi ve para dönüşünü arttırmak amaçlanmaktadır. İşletmede, değer katan ve katmayan faaliyetlerin ayrıştırılması değer akışı analizi ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Değer akışı haritalama, otomotiv, sürekli iyileştirme, Toyota üretim sistemi, yalın üretim.

Abstract

In a competitive environment where production resources are limited and operating costs are high, it is aimed to plan the resources to be used and to produce factors such as quality, usability and design that will ensure customer satisfaction with low cost and high profitability. In line with these targets, it is desired to eliminate waste. The purpose of the research; It is to examine the system as a whole with lean production principles and to produce with the concept of zero stock according to customer demand. The main purpose of value stream mapping, which is the method to be used in this study, is to identify waste and determine the necessary steps to remove it. The research was conducted on the simplification of Toyota Boshoku Sewtech Turkey, an automobile seat cover manufacturer operating in the automotive industry that has adopted lean manufacturing. As a result of the research, it is aimed to ensure customer satisfaction, shorten the flow time, identify waste resources and increase the return on money. In the business, the separation of value-adding and non-value-added activities was carried out by value stream analysis. At the end of the study, suggestions were presented.

Keywords: Automotive, continuous improvement, lean manufacturing, Toyota production system, value stream mapping.

¹ Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
iremduzdar@duzce.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-7642-8121.

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı / Programı, İstanbul, Türkiye.
senanr.celk@hotmail.com, Orcid.org/0000-0001-7683-0025.

1.GİRİŞ

Üretimde mükemmellik ve sürekli iyileştirme sunan yalın üretim sisteminin amacı, değersiz tüm işlemleri yok etmektir (Yılmaz, 2012). Toyota Üretim Sisteminin kurucusu Taiichi Ohno (1988), israf tanımını yaparken değer yaratmayıp kaynak tüketen faaliyet olarak açıklamıştır.

Değer akışı, müşterinin talebine ve ihtiyaçlarını gidermesine, uygunluğuna göre belirlenir ve iş adımları boyunca harcanan toplam süredir (Rother & Shook, 1998). İşletmede, değer katan ve katmayan faaliyetlerin ayrıştırılması değer akışı analizi ile yapılmaktadır (Wang & Yuan, 2009). Değer akışı haritalama yöntemi, değer akışı analizi için en önemli yalın üretim tekniğidir (Sarı, 2018). Çalışmada kullanılacak olan değer akışı haritalamanın temel amacı, israfları tespit etmek ve kaldırılması için gerekli adımları belirlemektir.

Değer Akışı Haritalama yöntemi için gerekli veriler toplanırken üretim sahasında gözlem, inceleme ve görüşme yapılacaktır. Haritalandırma yaparken, takt zamanı, akış süresi, üretim parti büyüklüğü, çalışan sayısı, vardiya, verimlilik ve diğer ölçütler bilgi akışı sağlamaktadır (TBSTR Eğitim Dokümanı, 2022).

Mevcut durum haritası, ürünün hammadde halinden sevkine kadar izlenmesi ve tüm adımların sembollerle ve verilerle tanımlanmasıdır. Sorunların sebeplerini incelemek için katkı sağlar. Gelecek durum haritası, değer sağlayan adımların akışını ve optimizasyon sağlanacak adımları sembol ve verilerle gösterir (Soydan, 2020).

İlk olarak ürün ailesinin belirlenmesi üzerine inceleme yapılacaktır. Belirlenen ürün ailesine göre mevcut durum oluşturulacaktır. Harita oluşturulurken ürünün gölgesi olup inceleme yapılacaktır ve operatörlerle doğrudan bilgi akışı sağlanacaktır (Manos,2006). Mevcut durumun haritalanma amacı sistemin nasıl işlediğinin anlaşılması ve gelecek durumun temelini izlenmesidir (Aydın,2009). Sistemin gözlemlenmesi sonucunda israf kaynakları tespit edilecektir. Tespit edilen kaynaklarda yalın prensipleri kullanılarak, problemlerin ortadan kaldırılması ve sistemin yeniden tasarlanması hedeflenecektir. Gelecek durum haritası hedefler sonucunda çizilecektir. Gelecek durum haritası çizilirken müşteri beklentileri tanımlanacak, tek parça halinde akış sağlanacak ve kalite yükseltilecektir. İşletmede, otomasyon sistemlerin bünyeye katılması, sürekli iyileştirme ve öğrenme altyapısının kurulması amaçlanmıştır. Mevcut ve gelecek durum kıyaslanıp incelenecektir. Bu incelemeler sonucunda uygulama aşamasına geçilecek ve sürekli iyileştirme amaçlanacaktır.

Bu araştırma, otomotiv sanayiinde faaliyet gösteren otomobil koltuk kılıfı üreticisi işletmenin yalınlaştırılması ve otomasyon sistemler kurması üzerine yapılacaktır. Araştırma sonucunda müşteri memnuniyetinin sağlanması, akış süresinin kısaltılması ve para dönüşünü arttırmak amaçlanmaktadır. Değer akışı haritalama yöntemi otomotiv sektöründe sıkça uygulanan bir yöntem değildir ancak bu yöntemin verimliliğe katkısı yüksektir. Mevcut durum inceleme sonrası planlanan yeni hat/makina tasarımı da firmanın dijitalleşme çalışmalarına katkı sağlayacak ve literatüre kazandırılacaktır. Bu nedenle çalışma diğer araştırmalara yol gösterici olacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde literatür araştırması kapsamında Değer Akışı Haritalama yöntemi incelenmiştir.

Mike Rother & John Shook (1999) “Görmeyi Öğrenmek” adlı eserleriyle Değer Akışı Haritalama yöntemi ile ilgili ilk eseri literatüre kazandırmıştır. Yazarlar bu eser ile Değer Akışı Haritalama yöntemini uygulamalı olarak ayrıntılı biçimde anlatmışlardır.

Birgün, ve ark. (2006) tarafından, traktör üreticisi olan bir firmada müşteri memnuniyeti sağlayıp düşük maliyetli üretim gerçekleştirmek amacıyla yalın üretime geçiş çalışmaları başlatılmıştır. Değer Akışı Haritalama yöntemi kullanılmış, jishuken çalışmaları yapıp israf kaynakları tespit edilmiştir. Haritalandırma sayesinde mevcut durum saptanmış ve sistemin performansının yükseltilmesi için öneriler sunulmuştur. Kanban sistemi ile temin süresinde iyileştirme yapılmıştır. Tedarik sıklığındaki artışın etkisini görebilmek adına simülasyon çalışması önerilmiştir.

Aydın (2009) yapmış olduğu çalışmada, sistemi bütünüyle ele almış olup müşteri odaklı Değer Akışı Haritalama yönteminin uygulanması üzerinde inceleme yapmıştır. Değer Akışı Haritalama yöntemi ile jishuken çalışması yapılması amaçlanmıştır. Yalın üretim sisteminin çalışanların üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 200 çalışana anket yöntemini uygulamıştır.

Alaca (2010) tarafından yapılan çalışmada uygulama alanı beyaz eşya sektörüdür. Çalışmasında Değer Akışı Haritalama yöntemini kullanan Alaca, 3 farklı haritalama aracından faydalanmış ve analizin sonucunda katma değer yaratmayan faaliyetleri elimine etmek için öneriler sunmuştur. Çalışmanın sonucunda stoklar ve teslimat süreleri azaltılmış olup kalitede iyileştirme yapılmıştır.

Çobanoğlu (2011) treyler fabrikasında Değer Akışı Haritalama yöntemini kullanarak darboğaz istasyonları tespit etmek üzere çalışmasını yapmıştır. Bu çalışmayla birlikte hat dengeleme, Kaizen, 5S, yürüme ve taşıma mesafelerinin azaltılması istenmiştir. Çalışmanın sonucunda akış süresi azaltılıp üretim kapasitesi artırılırken işçilikten tasarruf sağlanmış, katma değeri olmayan operasyonlar, taşıma mesafeleri azaltılmıştır. Bu iyileştirmeler neticesinde kar sağlanmıştır. Yalın üretimin önemli operasyonlarından biri olan kanban kullanımı için şartlar sağlanamadığından uygulamaya yer verilmemiştir.

Sarı (2018) müşteri memnuniyetini arttırmak ve çalışmalarını iyileştirmek için çözüm arayışı içerisinde olan otomotiv yan sanayiinde faaliyet gösteren cıvata – somun üretim işletmesinde çalışmasını gerçekleştirmiştir. İşletmenin problemleri gözle görülür hale gelmiştir. Bu problemler, üretim alanında çok fazla yarı mamul stoku bulunması, hammaddenin sipariş sonrasında temin süresinin uzun olması, üretim hatlarında izlenebilirliğin zor olması, darboğazlar nedeniyle geç teslim süreleridir. İşletmede çevrim süresi kısaltılma araştırmaları yapılırken fazla stok problemi ile karşı karşıya gelinmiştir. DAH yöntemi ile işletmenin ulaşacağı gelecek durum göz önüne serilmiştir. Çevrim süresi azaltılmış, stok miktarı düşürülmüştür. İşletmede jishuken çalışmaları yapılmış olup, kalitede maliyetler de düşürülmüştür.

Tekin ve ark. (2018) tarafından çalışma un fabrikasında yapılmıştır. Değer Akışı Haritalama yöntemi kullanılarak süreç bütünüyle ele alınmış olup, değer katan ve katmayan bütün faaliyetler incelenmiştir. Çalışmada yalın tekniklerinin uygulanması sonucunda israfa sebep olan tüm unsurların sıfırlanması amaçlanmış, esnek işletme hedefine ulaşılmıştır.

Sevgili & Antmen (2019) ağır iş makinesi aksamı üreten metal işleme fabrikasında yalın üretim teknikleri üzerine çalışma gerçekleştirmiştir. Fabrikada uygunsuz ürünler nedeniyle yeniden işleme ve tahsis işlemleri sık uygulanmaktadır. Çalışma ile akış süresinin azaltılması, verimlilik ve üretim miktarının artırılması, proses değişkenliğinin azaltılması hedeflenmiştir. Parça akışı FIFO düzeninde yapılmış ve kanban sistemi getirilerek ara stoklar minimize edilmiştir. Üretim akış süresi totalde kısalmış olup müşteri talebine hızlı dönüş yapılmıştır. İşletmeye kanban uygulanması, iş adımlarının tekrar düzenlenmesi, hat dengeleme ve FIFO düzeni, performans ölçüm sistemi, iş emri uygulaması önerilmiştir.

Şahin & Akolaş (2020) otomotiv sektöründe üretim yapan bir işletmede uygulama yapmışlardır. İşletmede ortak yürütülen kabin ve kapı imalatında kabin montaj süresini iyileştirmek ve hasarları engellemek için kapının kabinden ayrı üretilmesi için iş adımları takip edilmiştir. İş adımları takip edildiğinde kapı montajının zaman israfına neden olduğu görülmüştür. İşletme için en uygun montaj seçimi yapılmış ve çalışma başarılı bir Kaizen çalışması özelliğini taşımaktadır.

Kökten (2021) çalışmasını ahşap sektöründe gerçekleştirmiştir. Müşteri talebini karşılamakta güçlük çeken, hammadde kaybından dolayı yüksek maliyetlere ulaşan, hataların yüksek ve ara mamul stokunun yüksek olduğu bir işletmede çalışma yapılmıştır. İşletmede mevcut durumda teçhizatın bakımı için herhangi bir sistem bulunmamakta ve çalışanların eğitim ihtiyaçları belirlenmemektedir. Değer Akışı Haritalama yöntemi ile israf kaynakları belirlenmiştir. Gelecek durum tespit edilerek, işlem süresi kısaltılması, hataların minimize edilmesi, akışı olumsuz etkileyen faktörlerin kaldırılması ve kalite iyileştirmesi hedeflenmiştir. Operatörlerin eğitimi ile farklı iş adımlarında da beklenmedik durumlarda yer alabilmesi sağlanmıştır. Çalışma beraberinde hammadde kullanımının maliyetlerinde tasarruf, akış sürecinde azaltma, teslimat gecikmelerinde azaltma, minimum stok ve hatalı üretimde iyileşme görülmüştür.

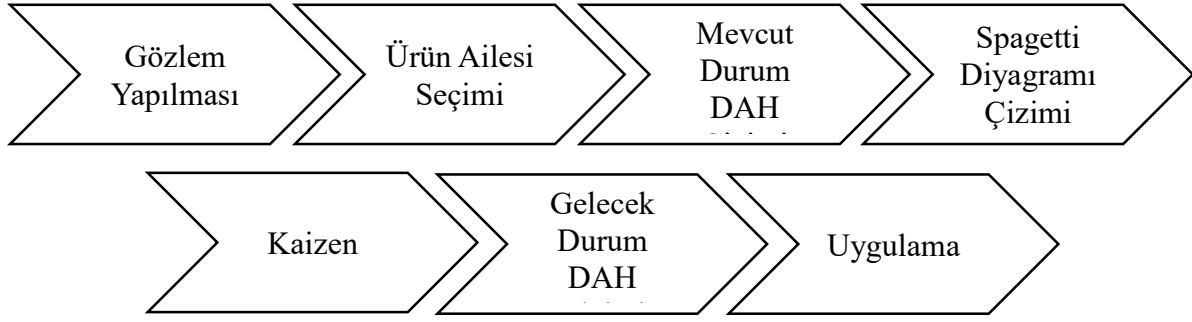
Kuğu & Köse (2021) ısı değiştirici üretim hattında Değer Akışı Haritalama yöntemi uygulayarak çalışma yapmışlardır. Mevcut durum haritası hazırlanarak Kaizen çalışmaları belirlenmiştir. Bu çalışma ile ara stok, operatör sayısı ve hat düzeninde iyileştirme yapılmıştır. Üretim süresi minimize edilerek kısa sürede ve minimum stok maliyetiyle ürün üretebilmişlerdir.

Guleria ve ark. (2022) şanzıman bileşenlerinin üretim hattında Değer Akışı Haritalama yöntemini uygulayarak çalışma yapmışlardır. Mevcut durum haritası çizildikten sonra altı sigma ve 5S yöntemi çalışmada uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda; üretim alanında alan kazancı elde edilmiş, red oranı, taşıma mesafesi ve tedarik süresi azaltılmıştır.

Ferreira ve ark. (2022) imalat sektöründe Endüstri 4.0 ve Değer Akışı Haritalama yönteminin entegrasyonunu tartışarak çalışma yapmışlardır. Çalışma endüstri 4.0 ile malzeme, ekipman, süreç ve bilgi takibi yapabileceğini göstermektedir.

3. METODOLOJİ

Bu araştırma, otomotiv sanayiinde faaliyet gösteren otomobil koltuk kılıfı üreticisi işletmenin yalınlaştırılması üzerine yapılacaktır. Araştırma sonucunda müşteri memnuniyetinin sağlanması, akış süresinin kısaltılması ve para dönüşünü arttırmak amaçlanmaktadır. İşletmede, değer katan ve katmayan faaliyetlerin ayrıştırılması değer akışı analizi ile yapılmaktadır. (Wang & Yuan, 2009) Değer akışı haritalama yöntemi, değer akışı analizi için en önemli yalın üretim tekniğidir. (Sarı, 2018) Değer akışı haritalama yönteminin adımları çalışmada izlenecektir. İlk olarak ürün ailesinin belirlenmesi üzerine inceleme yapılacaktır. Belirlenen ürün ailesine göre mevcut durum oluşturulacaktır. Harita oluşturulurken ürünün gölgesi olup inceleme yapılacaktır ve operatörlerle doğrudan bilgi akışı sağlanacaktır. (Manos,2006) Mevcut durumun haritalanma amacı sistemin nasıl işlediğinin anlaşılması ve gelecek durumun temelini izlenmesidir. (Aydın, 2009) Sistemin gözlemlenmesi sonucunda israf kaynakları tespit edilecektir. Tespit edilen kaynaklarda yalın prensipleri kullanılarak, problemlerin ortadan kaldırılması ve sistemin yeniden tasarlanması hedeflenecektir. Bu hedefler doğrultusunda gelecek durum haritası çizilecektir. Gelecek durum haritası çizilirken müşteri beklentileri tanımlanacak, tek parça halinde akış sağlanacak ve kalite yükseltilecektir. İşletmede, sürekli iyileştirme ve öğrenme altyapısının kurulması amaçlanmıştır. Mevcut ve gelecek durum kıyaslanıp incelenecektir. Bu incelemeler sonucunda uygulama aşamasına geçilecek ve sürekli iyileştirme amaçlanacaktır.



Şekil 1. Değer Akışı Haritalama Adımları, (Başak ve ark., 2019)

Şekil 1’de değer akışı haritalama adımları şematik olarak gösterilmiştir. Analiz yaparken öncelikle sahada gözlem yapılacaktır. Değer belirlendikten sonra ürün veya hizmet ailesi için değer akışı tanımlanacaktır. Seçilen ürün ailesi için sahadan veri toplayarak mevcut durum haritalandırılacaktır. Operatörlerin yürümlerini gözlemlemek için spagetti diyagramı çizilecektir. (Yalçın ve ark., 2017) Kaizen çalışması üretime uygulanacaktır. Gelecek durum çizilirken mevcut durum haritası incelenecek ve sorunlar giderilecektir. (Rother & Shook, 1998) Yapılan iyileştirme çalışmaları uygulanacaktır.

DAH yöntemi için gerekli veriler toplanırken üretim sahasında gözlem, inceleme ve görüşme yapılacaktır. Haritalandırma yaparken, takt zamanı, çevrim zamanı, akış süresi, makine kullanım oranı, üretim parti büyüklüğü, çalışan sayısı, vardiya, verimlilik, gözlenen stok, set sayısı ve diğer ölçütler bilgi akışı sağlamaktadır.

Tablo 1.

Kavram	İşlem
Takt Zamanı	Ürünün talep hızı (Liker, 2005)
Çevrim Zamanı	Ürünün tamamlanma sıklığı (Marchwinski & Shook, 2007)
Akış Süresi	Değer akışında ürünün başlangıcından bitişine kadar geçen süre (Sevgili & Antmen, 2019)
Verimlilik	Çıktı/Girdi (Yükçü & Atağan, 2009)

Üretim müdürü, üretim mühendisi ve takım liderleriyle birlikte çalışılacaktır. Süreçte görev alan çalışma ekibiyle çalışma ilerleme durumu gözlemlenmesi için toplantılar planlanacak ve beyin fırtınası yönteminden faydalanılacaktır. Mevcut durumun değer akış haritası oluşması beraberinde iyileştirme yapılacak alanlar belirlenecek ve gelecek durumun haritası çizilecektir.

Değer Akışı Haritalama yöntemi, iş süreçlerinin detaylı haritasını ortaya koymaktadır. İsrarların gözlemlenmesi ve israf sebeplerini açığa çıkarır, İş akışında, iş adımları net bir şekilde ortaya koyulur ve etkileri incelenir, Yapılan Kaizen çalışmalarında tutarlılık ve planlı yapılması sağlanır, Gözlemlenemeyen problemler ortaya çıkar.

4. DEĞER AKIŞI HARİTALAMA

“Toyota Üretim Sistemi” tarafından, sistemi yalınlaştırma doğrultusunda ideal durumu ortaya çıkartmak için değer akışı haritalama tekniği uygulanır. Malzeme akışı, bilgi akışı ve insan/proses akışı ilgilendiğimiz süreçlerdir. Bu akışlardan ilk ikisi değer akışı haritalamada kullanılmaktadır. (Rother & Shook, 1998).












Değer akışı, katma değer oluşturan unsurları (tedarikçi, imalat ve müşteri) kapsarken, değer akışı haritalandırma üretim sürecinde malzeme ve bilgi akışının ortaya konulmasıdır (Seth & Gupta, 2005). Değer akışı haritalama; müşteri talebinden sevkiyata kadar gerekli olan malzeme ve bilgi akışlarının mevcut olduğu diyagramdır (Marchwinski & Shook, 2007). Değer akış haritalama tekniği, mevcut durumdaki israfları görsel olarak gözlemlemek ve gelecek durum planlama süreçlerini içerir (Jones & Womack, 1990).

Ohno'nun 7 temel israfını temel alan katma değer oluşturmeyen ve katma değer oluşturan faaliyetler değer akışı haritasında gözlemlenir. Değer akışı haritalama değer katmayan faaliyetleri ve değer katan faaliyetlerin belirlenmesini içerir (Hines ve ark., 1998).

Değer akış haritalama tekniği, mevcut durumdan daha iyi bir durumun ortaya çıkmasında, iyileştirme noktalarının görülmesinde fayda sağlamaktadır. Katma değer yaratan süreçler ve katma değer yaratmayan süreçlerin ayrışmasında kolaylık sağlamaktadır.

4.1. Ürün Ailesinin Seçimi

Müşteriler, talep ettikleri ürünle ilgilendikleri için ürün ailesi seçimi yaparken müşterinin istek ve ihtiyaçlarına uygun duruma odaklanılması gerekmektedir. Tüm ürünlerin tek bir haritada gösterilmesi mümkün değildir. Ürünleri gruplandırıp değer akışı haritalama yapmak daha sağlıklı olacaktır. Ürün ailesi seçilirken, üründeki farklılıklar göz önüne alınmalıdır (Aydın, 2009).

Bilgi Sembolleri	Tanımı	Açıklama
	Kamyolla Sevkiyat	Sevkiyat sıklığı takip edilmelidir
	Bilgi akışı	Bilgi iletimi ve süreçler arasında bağlantı kurmaktadır.
	Malzeme Akışı	Malzemenin üretime gelmesi.
	Raf stok	FIFO ile depolama işlemi yapılır.
	Müşteri/Üretici/Tedarikçi	Müşteriye, üreticiye, tedarikçiye ait bilgiler not edilir.
	Proses	Montaj, teslim alma, toplama, sevkiyat vb. işlemleri belirtilir.
	Talimat	Sipariş programı, üretim emri vb.
	Kanban raflanması	Üretime girecek kanbanların FIFO mantığında sıralanması.
	Üretim emri kanbanı	Üretime başlanması gerektiği bilgisini verir
	Çekme kanbanı	Sonraki istasyonun önceki istasyondan istediği parça bilgisi
	Geçici depolama	Sırası ve kuralı olmayan, durağan bir malzeme.

Şekil 1. Değer Akış Haritası Oluşturulurken Kullanılan Semboller (TBSTR Sembol Dokümanı, 2022)

Şekil 1'de değer akış haritası oluşturulurken kullanılan semboller liste halinde tanımlanmış ve açıklanmıştır.

4.2. Mevcut Durum Haritasının Çizimi

Gelecek durumun önerilmesi, üretim sistemin daha iyi bir hale getirilmesi mevcut durum analizi ile başlar. Mevcut durum haritası ürünle ilgili süreçlerin ilerleyişinin takibinin yapılabildiği yalın üretim tekniğidir. Mevcut durum tek başına yeterli olmayacaktır. Mevcut durum sonrasında gelecek durum haritası çizilmelidir (Efe, 2011). Ürün ailesi seçildikten sonra seçilen ürün grubunun mevcut durumu çizilmelidir (Sedefoğlu, 2018).

Haritalandırma yaparken, prosesleri ve akışlarını görmek için sembol kullanırız. Mevcut durum verileri toplanırken, malzeme ve bilgi akış yolları boyunca haritalandırma yapan kişinin yürümesi önerilir. Akış ve proses ile ilgili genel bilgilenmek için öncelikle hızlı bir şekilde gözlem yapılması gerekmektedir. Gözlem sonrasında her prosesle ilgili ayrı ayrı bilgi toplanmalıdır. Akış boyunca yürüyüp görevi uygulayan insanlarla yüz yüze görüşmeler yapmak mevcut durumu anlamayı kolaylaştıracaktır (Aydın, 2009). Tedarik sürecinden başlayıp değer akışı doğrultusunda yürümek yerine, teslimat sürecinden akış yönünün tersine doğru çalışmak tavsiye edilmektedir. Bütün değer akışını tek bir kişinin çizmesi, akışı bölümlendirmeden haritalandırmak önemlidir çünkü farklı kişiler haritalarsa bütünü anlaşılmaması zor olmaktadır (Rother & Shook, 1999).

Mevcut durum haritasını çizmeyi beş aşamada inceleyebiliriz. İlk adım; müşteriye ait olan bilgilerdir. İkinci adım; üreticiye ait olan proseslerin bilgileridir. Üçüncü adım; ürünü oluşturmak için ihtiyaç duyulan ham maddelerin tedarikçilerinin kimler olduğu, tedarik sıklığının gösterilmesidir. Dördüncü adım; bilgi akışının gösterilmesidir. Son adım; ham madde halinden müşteriye ulaşana kadar ürünün işlem süresi ve işlem süresinin ne kadarının değer katan faaliyet olduğunun belirlenmesidir. Değer belirlendikten sonra, değer katmayan faaliyetler gelecek durum haritasını oluşturacaktır (Aydın, 2009).

4.3. Gelecek Durum Haritasının Çizimi

Gelecek durum haritası, mevcut durum haritasının iyileştirilmiş durumudur. Burada amaç, israf kaynaklarını ortaya çıkartmak ve ortadan kaldırılmaktır. Uzman, mevcut durum haritasını oluştururken gözlem esnasında iyileştirme alanlarını da ortaya koymaktadır. Mevcut durum incelemesi tamamlandıktan sonra israf noktalarına dair problemler belirlenir ve gelecek durum haritası çözüm belirlendikten sonra çizilir. Mevcut durum haritası süreçteki darboğazları gösterir ve iyileştirmeler üzerine çalışma yapılır (Birgün ve ark., 2006).

Gelecek durum haritasında bulunan iyileştirmeler için;

- SMED uygulaması yapılmalı,
- İsrarlar ortadan kaldırılmalı,
- Parti büyüklüğünde azalma sağlanmalıdır (Rother & Harris, 2001).

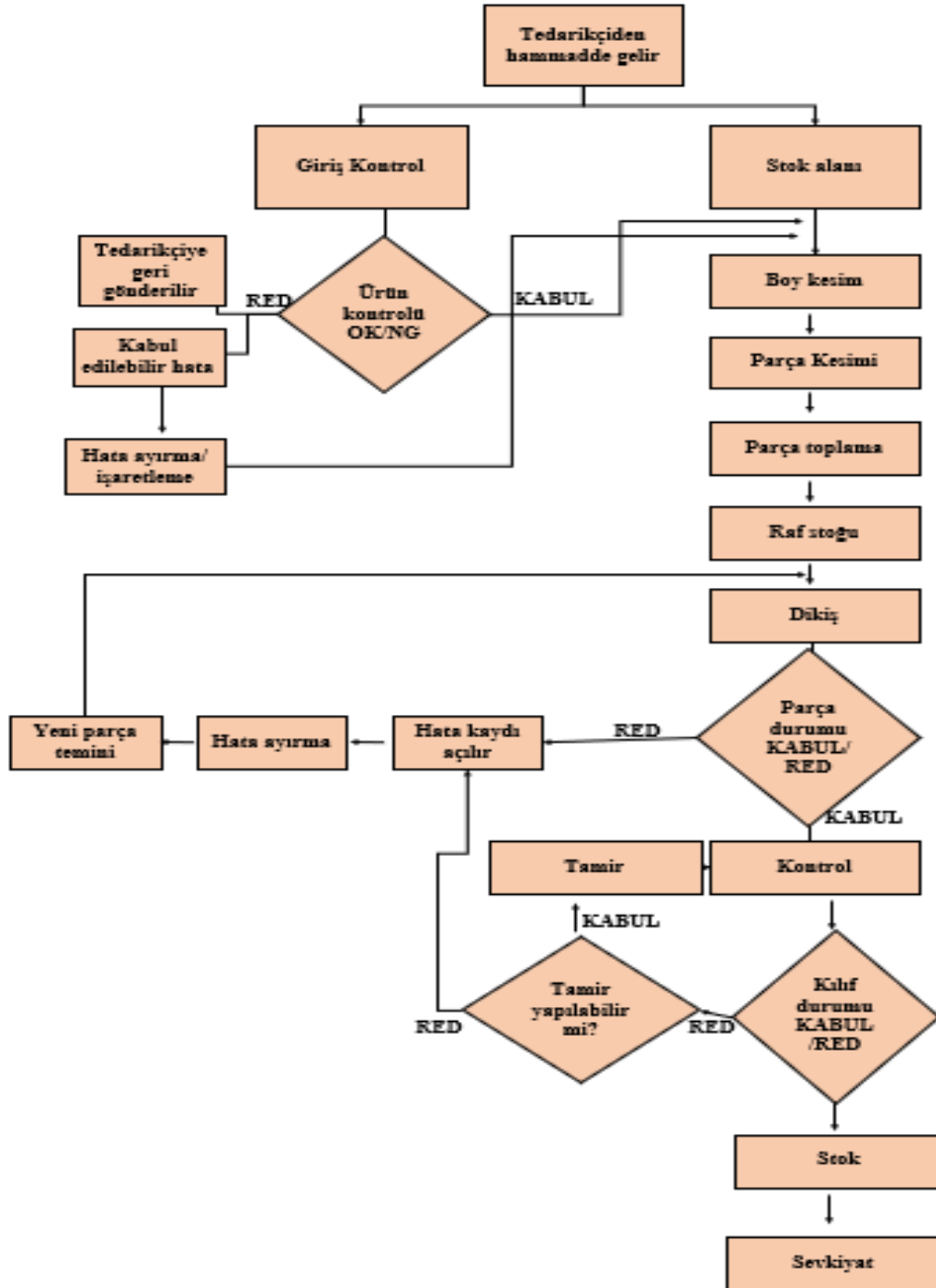
5. YALIN ÜRETİM SİSTEMİNDE DEĞER AKIŞI HARİTALAMA ÖRNEĞİ “TOYOTA BOSHOKU SEWTECH TÜRKİYE

Toyota Boshoku Sewtech Türkiye (TBSTR), otomobil koltuk kılıfı üreten bir şirkettir. Bu araştırmada bir ürün ailesi göz önüne alınacak olup en çok üretilen ürün üzerine çalışılacaktır. Seçilen ürün ailesi Toyota marka otomobillerin bir modelinin koltuk kılıfıdır. Fabrikada X, Y, Z ve T modelinde koltuk kılıfları bulunmaktadır. Toyota Boshoku Sewtech Türkiye (TBSTR) fabrikasında seçilen ürün ailesi için üretim prosesleri; kesim, dikiş 1, dikiş 2, dikiş 3, dikiş 4, dikiş 5 hattından oluşmaktadır. Üretilen ürünler günlük olarak müşteriye montaj için sevk edilmektedir. Firma güvenliği nedeniyle ürün isimleri kullanılmamıştır.

5.1. TBSTR Değer Akışının Özellikleri

TBSTR sistemli bir üretime sahiptir. Üretim müşterinin ihtiyaçlarını tam karşılamaya ve üretimde olası değişiklikler ve hataları azaltmaya çalışmaktadır. TBSTR üretim hatlarında her ürün için takt zamanı ve operatör sayısı bellidir.

Üretim zamana düzgün yayıldığından ve takt zamanı göre üretim yapıldığından yığın üretim ve tüketim bulunmamaktadır. TBSTR talebe göre üretim yapmaktadır böylece her parça her gün üretilmesi anlayışı yok sayılmaktadır.



Şekil 2. Üretim Akış Diyagramı

Şekil 2’de Genba da (üretim) oluşan akış diyagramında firmaya ilk olarak tedarikçiden ham madde gelmektedir. Ham madde giriş kontrol ve stok alanı olmak üzere iki alana ayrılmaktadır. Giriş kontrol aşamasına gelen ham madde, örnekleme yöntemi ya da hata miktarına göre seçilmektedir. Giriş kontrole gelen üründe problem yoksa stok alana gitmektedir. Problem varsa; bu problem kabul edilebilir seviyede ise kusurlu alan işaretlenir ve stok alanına gider eğer kabul edilebilir seviyede değilse de tedarikçiye geri gönderilir. Ham madde stok alanından sonra boy kesim yapılması için kesim operatörü tarafından araba ile taşınarak kesim hattına gelmektedir. Kesim hattında öncelikle boy kesim işlemi yapılır ardından parça kesim işlemi yapılır. Kesilen parçalar taşıma arabasına dizilir ve raflama alanına düzenli bir şekilde stok yapılır. Dikiş hattı, kesim hattının yaptığı stok rafından faydalanarak işleme başlar. Dikiş işlemi tamamlandıktan sonra kalite kontrol aşamasına gelinir. Kalite problemi yoksa stoklanır ve ardından müşteriye sevk edilir. Kalite problemi yaşandıysa hatanın düzeltilip düzeltilemeyeceği kontrol edilir. Düzeltilebilir bir hataysa düzeltilip tekrardan kontrol edilir ve ardından stok ve sevk süreci başlar. Hata düzeltilemez ise hata kaydı açılır, dikiş hattına yeni parça temin edilir ve adımlar tamamlanır.

5.2. Ürün Ailesi Seçimi

Çalışmada ürün ailesi seçimi en çok üretilen ürüne göre planlanmış olup D Ürünü üretimi seçilmiştir (Başak ve ark., 2019).

Tablo 2. Ürün Ailesi Seçimi

Koltuk Kılıfı					
X Modeli	Y Modeli*			Z Modeli	T Modeli
280	450			430	380
	A Ürünü	B Ürünü	C Ürünü	D Ürünü*	
	75	15	10	350	

Tablo 2’de koltuk kılıfı için ürün ailesi seçimi üzerine inceleme yapılmaktadır. İşletmede üretim müşterinin talep ettiği miktara göre yapılmaktadır. İlk olarak, model bazında en çok üretilen ürün seçilmiştir. Bu ürün, Y Modelidir. Bir sonraki adımda Y Modeli içerisinde yer alan ürünler listelenmiş olup, en çok üretilen D Ürünü çalışma için seçilmiştir.

5.3. Mevcut Durum Haritası Çizimi

Harita oluşturulurken teslimattan başlanarak gözlemleyip operatörlerle yüz yüze görüşerek bilgi ve veri toplanmıştır. Çalışma değer akışı haritalamada TB Sewtech Türkiye (TBSTR) firmasının mevcut verilerinin temini ile başladı. TBSTR, MIFA başlığında değer akış haritası çizmektedir.

Şekil 3’de mevcut durum haritası anlatılmaktadır.

Firmanın müşterisi mevcut durum haritasının sağ köşesinde fabrika sembolü ile gösterilmektedir. Müşteri iki vardiya çalışmaktadır. Değer akışı haritalama yönteminde TBSTR, Kanban çemberi kullanmaktadır. Örneğin TBSTR, Kanban çemberi kullanarak günde kaç kez kaç sevkiyat sonra teslimat yapacağını göstermektedir. Son ürünün, günde 5 kez 5 sevkiyat sonra tekrar geleceğini gösterir. Haritanın 1. Aşaması müşteri bilgileri yazılarak tamamlanmaktadır.

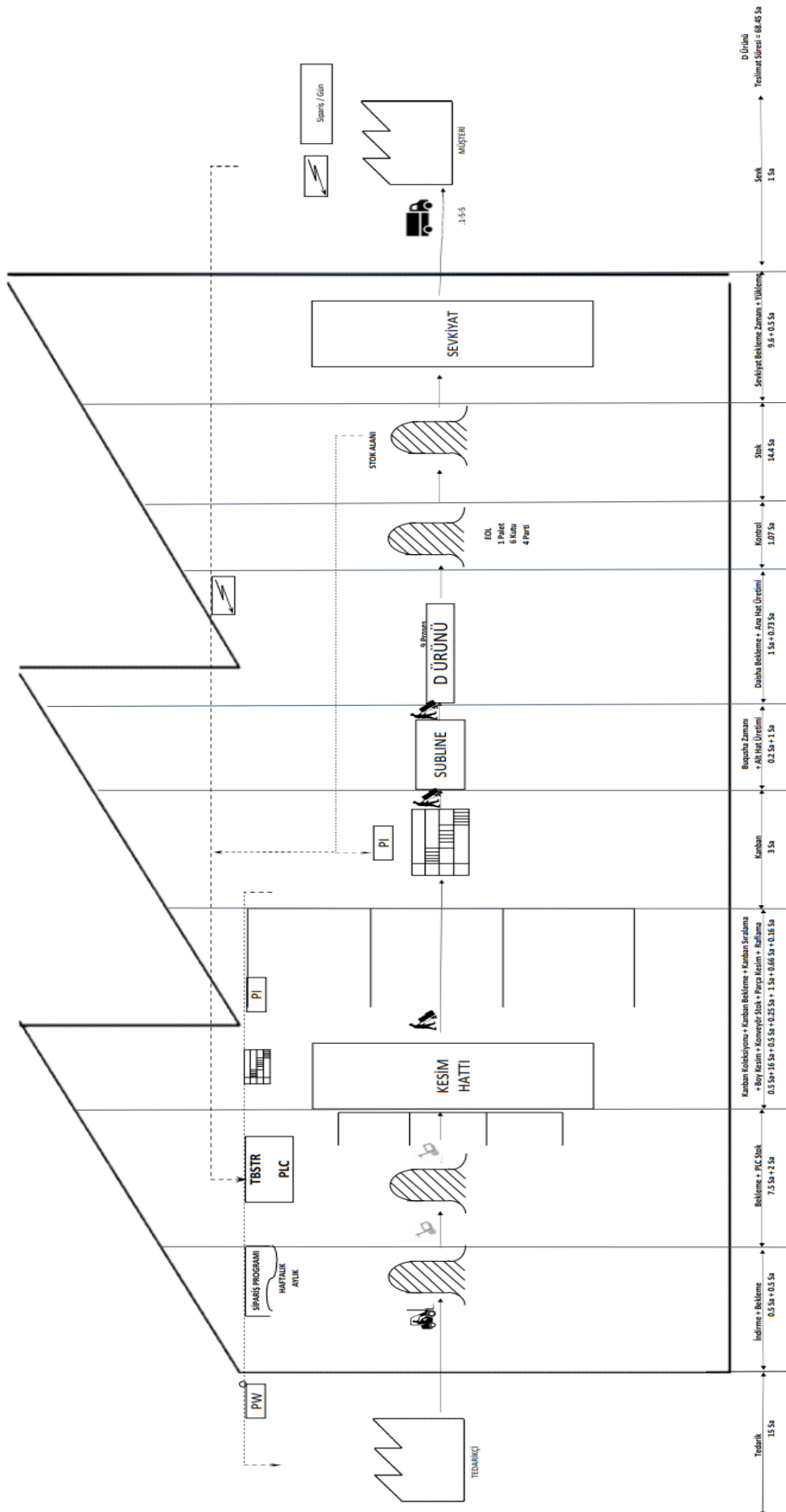
Büyük fabrika sembolüyle üretici (TBSTR) simgelenmiştir. Çizilen sembol ham madde tedarik sürecinden, ürün sevkiyatına kadar olan ürün akışını göstermektedir. Büyük fabrika ikonu içerisinde proseslerin yerleşimi net bir şekilde görülüp ürünün giriş çıkışları gözlemlendiği için

kolay anlaşılabilir. TBSTR üretim sürecine ait bilgiler yazılır. Prosesler arasında stok miktarı gösterilir. Haritanın 2. Aşaması üretici bilgileri yazılarak tamamlanmaktadır.

İşletmenin tedarikçi firmaları mevcut durum haritasının sol köşesinde fabrika sembolü ile gösterilmektedir. Tedarikçiden malzemenin gelişi için taşıma aracı sembolü kullanılmıştır. Haritanın 3. Aşaması tedarikçi bilgileri yazılarak tamamlanmaktadır.

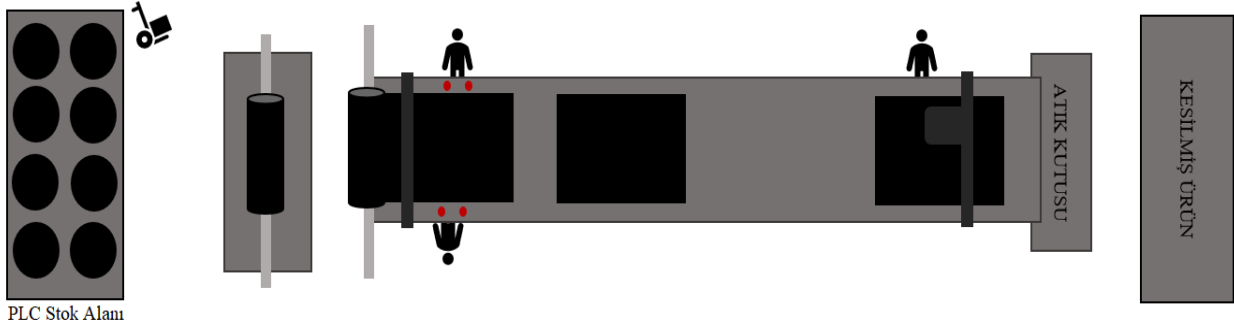
Bilgi akışı ince kesikli çizgi ile gösterilmiştir. TBSTR üretimi, düşen Kanban bilgisine göre başlatır. Müşteri ürün talep ettiğinde, talep edilen ürüne ait Kanbanlar üretime verilir. Üretim emrine göre buqusha (ham madde veya ara mamul taşıyıcı) üretilecek ürüne ait parçaları raf stok alanlarından toplayarak üretim yapılacak hatları besler ve parçalar son ürün için gerekli adımlardan geçtikten sonra üretim tamamlanır.

TBSTR, yığın stok tutmamaktadır. Ham madde üretime girdiği anda tedarikçiye azalan ham maddenin Kanbanı fiziksel olarak iletilmektedir. Çekme tarzı üretim sistemini benimseyen TBSTR, süreçler arasında FIFO hatları uygulamaktadır. Barkod sistemi ile son ürün sevk sırasında kontrol edilmektedir. Sistem, üretim emri ile Kanban bilgisinin uyumluluğunu kontrol eder, uygunsa sevkiyat süreci başlatılır.



Şekil 3. Mevcut Durum Haritası

Ham maddenin bekleyiş süresi, üretim süresi, bekleme süresi ve stok süresi haritanın alt kısmında zaman ekseninde gösterilir. Zaman ekseninde gösterilen değerler toplanarak teslimat süresi (üretim akış süresi) hesaplanır. Haritanın son aşaması üretim akış süresi bilgileri yazılarak tamamlanmaktadır.



Şekil 4. Mevcut Kesim Hattı



Şekil 5. Mevcut Durum İş Sıralaması

Şekil 4 ve Şekil 5’de mevcut hatlarda PLC hammadde fabrikaya geldikten sonra stok alanında üretim emrine göre ruloları stoklar. Kesilmesi gereken rulonun Kanbanı iş emri olarak kesim hattına düşer. Kesim hattı operatörü (1 veya 2) bulunduğu hattan stok alanına araba ile gidip ruloyu arabaya yükler ve hatta geri döner. Rulo kesim hattında bulunan sehpa araba desteğiyle düşürülür. Sehpa düşürülen rulo kesim hattına 2 operatörün de desteğiyle takılır. Ruloya ait Kanban okutulur ve gerekli bilgiler elde edilir. Rulo boy kesim için düzenlenir ve boy ayarlaması yapılır. Rulo üst üste kat olacak şekilde kesilir. Şekil 2.’de görülen kırmızı düğmeye operatörler (1 ve 2) dokunduğunda kat kesilir. Kesilen pasta parça kesim için sırada bekler. Parça kesim öncesi ara stok bulunur. Parça kesimi yapılacak pasta Kanbanı sisteme okutulur. Makine tarafından operatör 3’ün desteğiyle pasta orijini (kenar sınırları) belirlenir ve parça kesimi başlatılır. Kesilen parçalar operatör 3 tarafından taşıma arabasına dizilir kalan parçalar atık kutusuna atılır. Taşıma arabası desteğiyle kesilmiş parçalar dikim stok alanına operatör 3 tarafından taşınır ve raflanır.

Operatör 1	Operatör 2	Operatör 3
Operatör üretim emrine düşen kanbanı alır.	Operatör üretim emrine düşen kanbanı alır.	Kanban okutulur.
Kanbana göre rulo temin eder.	Kanbana göre rulo temin eder.	Orijin belirlenir.
Rulo araba ile kesim hattının önüne taşınır.	Rulo araba ile kesim hattının önüne taşınır.	Parça kesilir.
Rulo arabadan sehpaye düşürülür.	Rulo arabadan sehpaye düşürülür.	Kesilen parça toplanır.
Sehpadan hatta takılır.	Sehpadan hatta takılır.	Atıklar ve sarf malzeme atık kutusuna atılır.
Kanban okutulur.	Kanban okutulur.	Malzeme stoklanmak üzere raflara taşınır.
Boy ayarlanır ve kat kesilir.	Boy ayarlanır ve kat kesilir.	Rafa stok yapılır.

Şekil 6. Mevcut Durum Operatör İş Birleştirme Tablosu

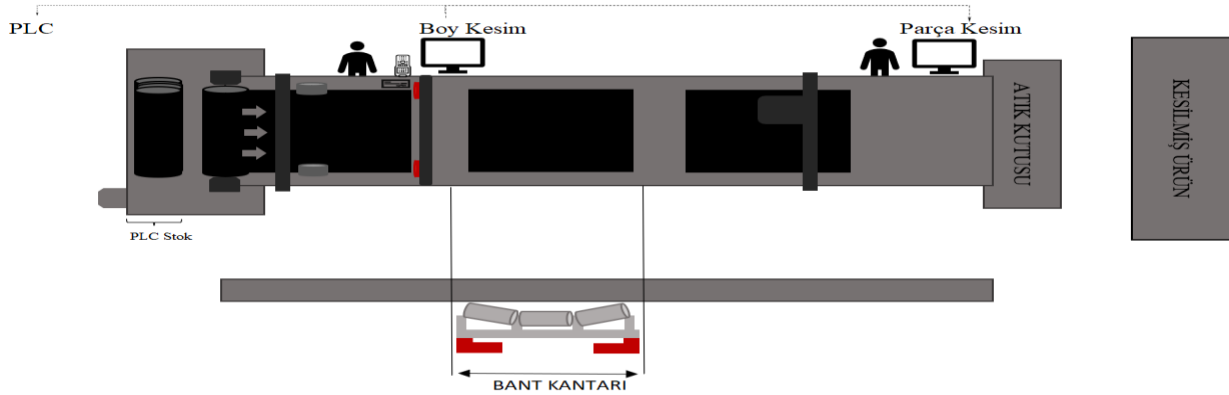
Şekil 6’da mevcut durum operatör iş birleştirme tablosu verilmiştir. Kesim hattının mevcut durumunda 3 operatör çalışmaktadır. 2 operatör boy kesim hattında, 1 operatör ise parça kesim hattında işlem görmektedir. Operatörlerin yapmış olduğu işler listelenmiştir.

5.4. Gelecek Durum Haritası Çizimi

Mevcut durum haritası ile üretim sürecindeki israf kaynakların tespit edilmesi ve gözlemler sonucunda iyileştirme uygulamalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Mevcut durum haritasında üretim sürecinin durumu ortaya çıkmıştır.

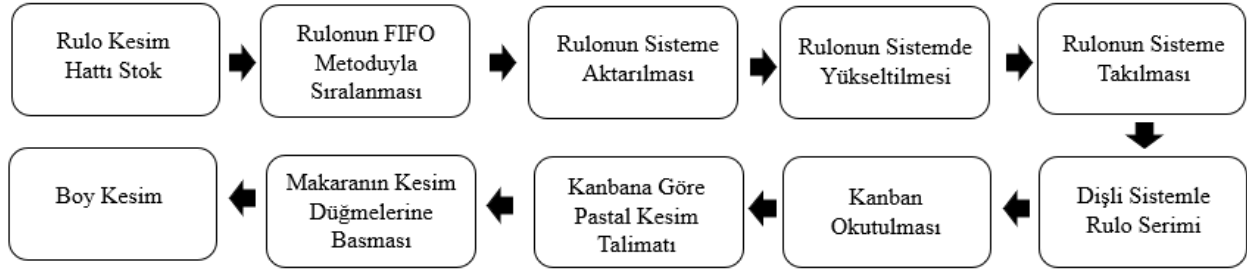
5.4.1. Problem noktaları

Kesim operatörünün ruloyu stok alanından kesim hattına taşıması yürüme israfıdır. Rulo alana geldikten sonra hatta takma işlemi sırasında ergonomi açısından lateral problem yaşanabilir ayrıca süreçte elleçleme sırasında darboğazlar oluşabilir. Ruloyu tutan demirin uzunluğu iş güvenliği problemlerine yol açabilir. Boy kesim makinesinde darboğazlar görülebilmektedir. Hat otomatikleştirilmeye çalışılarak iş dengesi sağlanması gerekmektedir çünkü hatta fazla operatör bulunmaktadır.



Şekil 7. Kaizen Kesim Hattı

Şekil 7’de Kaizen kesim hattı anlatılmaktadır. Otomotiv sanayiinde yer alan işletmede, rulo taşınmasının oluşturduğu yürüme israfı, operatör fazlalığı, hatta takma işleminde oluşabilecek lateral ve iş güvenliği problemlerini ortadan kaldırmak ve darboğazları önlemek açısından kaizen ön görülmüştür. Boy kesim makinesinde oluşan darboğazlar gözlemlenmiş süreç, operatör minimizasyonu ve yürüme israfının ortadan kaldırılması hedeflenmiştir. Boy kesim hattında yeni makine tasarımıyla, mevcut darboğazların önlenmesi planlanmaktadır.



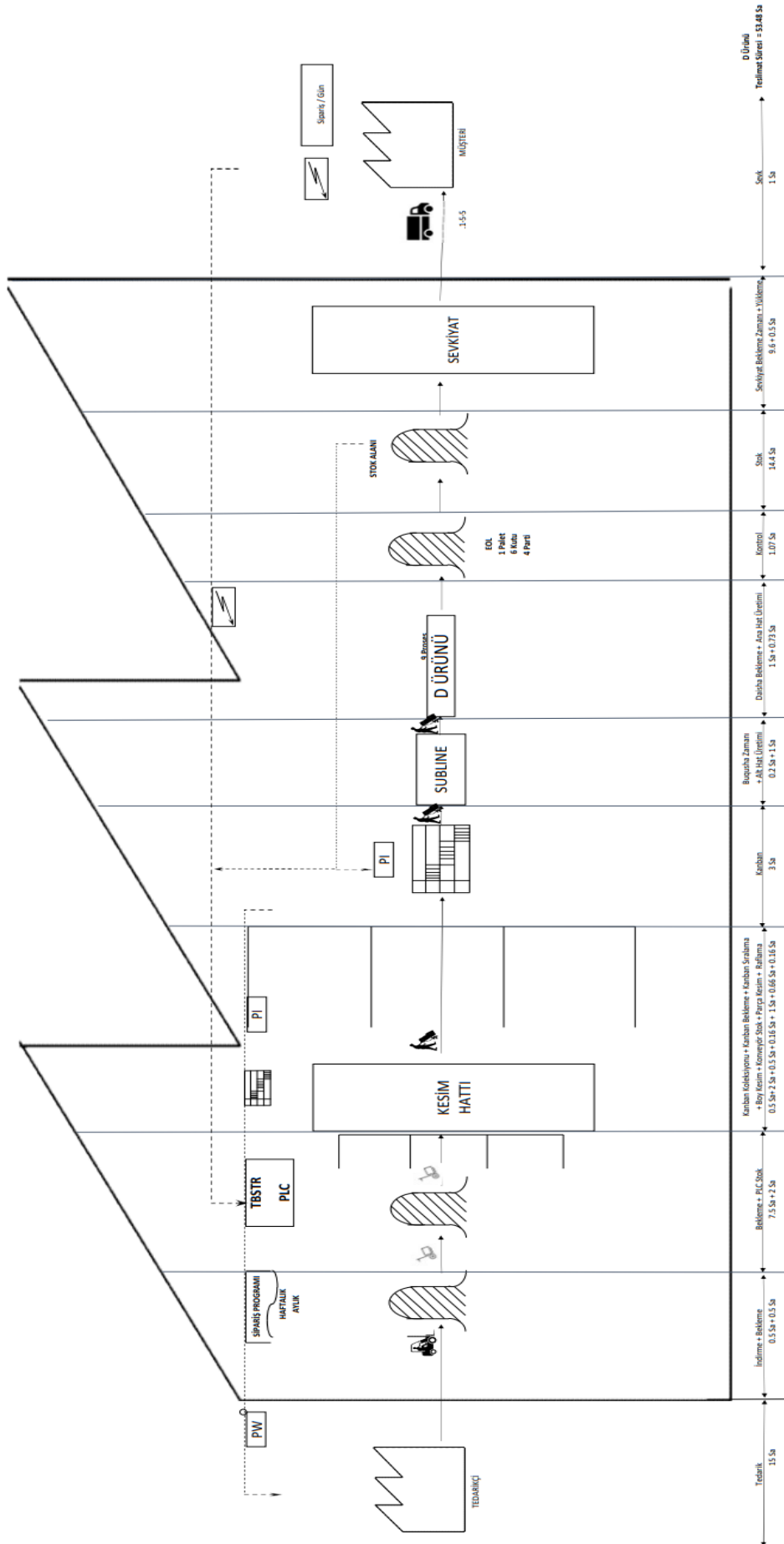
Şekil 8. Gelecek Durum İş Sıralaması

Şekil 8. ‘de gelecek durum iş sıralaması anlatılmaktadır. Kaizen Kesim Hattında giriş lojistik stok alanı kaldırılmış olup kesim hattı 2 saatte bir giriş lojistik tarafından beslenecektir. Kesim hattında stoklanan rulolar üst üste sıralı bir sistemde bekleyecektir ve bu sistemde FIFO mantığı uygulanacaktır. Kesilecek olan rulo operatör tarafından kesim alanının altında bulunan asansörlü sisteme düşürülecek pedal yardımıyla kaldırılacaktır. Rulo sistemde olan tutuculara takılacaktır burada rulonun takıldığı boru sistemi kaldırılacak olup iş güvenliği sorunu ortadan kaldırılacaktır. Dişli sistemle beraber rulo serimi başlatılacaktır serilen rulo makaralara bağlanacaktır. Rulonun ucundaki Kanban sistem tarafından okunacaktır. Sistemdeki bilgilere göre kesim yapılacaktır. Rulo bilgisine göre boy ayarlaması yapılacaktır. Makaralar kırmızı düğmelere geldiğinde pastal kesimi gerçekleştirilecektir. Kesilen pastalların stoklandığı alanda bant kantarı yardımıyla ağırlık ölçümü yapılacaktır. Bu ağırlık ölçümü sayesinde hatalar minimize edilecektir.

Operatör 1	Operatör 2	Operatör 3
Rulo sisteme aktarılır.		Kanban okutulur.
Rulo sistemde yükseltilir.		Orijin belirlenir.
Rulo sisteme takılır		Parça kesilir.
Kanban okutulur.		Kesilen parça toplanır.
Sistemin takibi yapılır.		Atıklar ve sarf malzeme atık kutusuna atılır.
		Malzeme stoklanmak üzere raflara taşınır.
		Rafa stok yapılır.

Şekil 9. Gelecek Durum Operatör İş Birleştirme Tablosu

Şekil 9’da gelecek durum operatör iş birleştirme tablosu verilmiştir. Kesim hattının gelecek durumunda 2 operatör çalışmaktadır. 1 operatör boy kesim hattında kontrol sağlanması için, 1 operatör ise parça kesim hattında işlem görmektedir. Operatörlerin yapmış olduğu işler listelenmiştir.



Şekil 10. Gelecek Durum Haritası

Şekil 10'da Gelecek Durum Haritası anlatılmaktadır. Mevcut durum haritası çizilirken indirme-bekleme, bekleme-giriş lojistik stok, kesim hattı, kontrol, sevkiyat öncesi stok, sevkiyat bekleme zamanı israf kaynakları olarak belirlenmiştir. İyileştirme önerisi kesim hattı için sunulmuştur.

Tablo 3. Operatör Dengelenmesi Maliyet

Hat Sayısı	Dengelenmiş İş Gücü	Vardiya Sayısı	Yıllık	Maliyeti
6	1	2	12	1000 Euro

Tablo 3'de operatör dengelenmesi önerisinin sonucunda ortaya çıkan maliyet tablosu anlatılmaktadır. İşletmede mevcut durumda 6 kesim hattı bulunmaktadır. İşletme 2 vardiya çalışmakta ve mevcut durumda her hatta 3 operatör çalışmaktadır. Gelecek durum sonrası her hattan 1 operatör azaltılmış olup 2 vardiya totalinde 12 operatör azaltılmıştır.

$$6 \times 1 \times 2 \times 12 \times 1000 = 144.000 \quad (1)$$

Denklem 1'de gösterdiği üzere işletmeye yeni hat ile 144.000 Euro kar sağlanmış olup, lead time 14,97 Sa azaltılmıştır.

Tablo 4. Mevcut ve Gelecek Durum Kazanımları

	Mevcut Durum	Gelecek Durum	Kazanç
Yürüme İsrافی <i>*Firma Bilgisi</i>	240 dk	40 dk	200 dk
Akış (TT: Çalışma Süresi/Üretim Adedi)	68,45 Sa	53,48 Sa	14,97 Sa
Personel Sayısı	36 Adet	24 Adet	144.000 Euro

Tablo 4'de mevcut durum ve öneri yapılan gelecek durum kazanım karşılaştırması yapılmaktadır. Mevcut durumda kesim hattında bulunan operatör rulo stok alanına yürüme gerçekleştirilmekteydi. Gelecek durumla beraber giriş lojistik kesim hattına 2 saatlik raf stoklaması yapmıştır. Kesim hattında görev yapan iş gücünün yürüme israfı ortadan kaldırılmıştır. Giriş lojistik departmanına bağlı iş gücünün de yürüme israfı 200 dk azaltılmıştır. Sistemde yapılan öneriler beraberinde akış süresi 14,97 Sa azaltılmış olup, personel sayısı 12 kişi azaltılmıştır. Firmaya, 144.000 Euro iş gücü, 14,97 Sa akış süresi, 200 dk yürüme israfı kazancı sağlanmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma yalın üretim prensiplerini benimseyen otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmada Değer Akışı Haritalama yöntemi uygulanarak yapılmıştır. İşletmede yapılan bu çalışma ile üretimde oluşan fazlalıkların giderilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada değer akışı haritalama yöntemi uygulanmıştır. Değer akışı haritalama yöntemi, mevcut durumda israfların gözlemlenmesi için uygulanmıştır. Firma bünyesinde birden fazla modelde üretim yapıldığı için ürün ailesi seçiminde en çok üretilen ürüne göre seçim yapılmıştır.

Mevcut durum haritası tüm süreçler gözlemlendikten sonra çizilmiştir. Bu haritayla beraber israf noktaları belirlenmiştir. İndirme-bekleme, bekleme-giriş lojistik stok, kesim hattı, kontrol, sevkiyat öncesi stok, sevkiyat bekleme zamanı israf kaynakları olarak belirlenmiştir.

İşletmede kesim hattı için iyileştirme çalışması önerilmiştir. Mevcut kesim hattında; iş gücü dengelenmesi yapılabilir, iş güvenliği ve ergonomi problemi yaşanabilir. İyileştirme öncesi boy kesim hattından bir operatör her Kanban düştüğünde giriş lojistik stok alanından rulo taşımak üzere hattı ayırılır ve giriş lojistiğinin oluşturduğu stok alanına gidip gelirdi. Bu nedenle yürüme israfı oluşmaktaydı. İyileştirme sonrasında giriş lojistik alana 2 saatlik stok yaptığı için kesim hattında çalışan operatör hattı ayırılması ve üretim emri geldiğinde yürüme israfının yapılması önlenmiştir. Kanban bekleme ve işlerin otomatikleştirilmesi nedeniyle akış süresi kısaltılmıştır. Boy kesim hattında bir operatör kontrol takibi için hatta duracağı için firma da bulunan 6 adet kesim hattından 1 personel azaltılmıştır.

Kumaş rulo serim ve kesim makinelerinde uzun vadede planlama yapıp hatları otomasyon hale getirerek oluşabilecek hatalar minimize edilebilir. İşletmeler için yeni makine satın alımları yüksek olabileceğinden mevcut durumdaki makine üzerinden yeni parça alımı ile düşük maliyetler elde edilebilir. Mevcut durumda boy kesim hattında 1 operatör oluşabilecek problemleri gözlemlemek adına hatta bulunmaktadır. İyileştirme önerisi üzerine çalışmalar yapılarak hattın kendi takibini yapılması sağlanabilir.

Gelecek durumda tasarlanan hat ile yürüme mudası %16,66 akış %0,08 personel sayısı %66,66 iyileştirilmiştir. İşletmeye yeni hat ile işçilik maliyetinden 144.000 Euro kar sağlanmış olup, teslimat süresi 14,97 Sa azaltılmıştır.

Yazarların Katkısı

Bu çalışmada 1. yazar fikir, eleştiri konusunda katkıda bulunmuştur. 2. yazar araştırma, veri toplama, analiz, yorum, kaynak taraması ve makalenin yazımı konusunda katkı sağlamıştır.

Teşekkür

Proje çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen yalın üretim prensiplerini benimseyen TB Sewtech Türkiye firması Genel Müdürü Sayın Cemal DEMİRCİ'ye Üretim Müdürü Sayın Turgay TEMİZ'e, araştırma sürecimde destek olan Kıdemli Mühendis Sayın Merve Saadet Yılmaz'a ve Uzman İmalat Mühendisi Sayın Onur Durmaz'a, çalışmamda firmayla buluşmamda destek olan İnsan Kaynakları Sayın Hümeysra CEYLAN'a ve firmanın tüm değerli çalışanlarına şükranlarımı sunarım. Çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Alaca, H. (2010). *Değer akış haritalama araçları ile değer zinciri analizi: Beyaz eşya sektöründe bir uygulama* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Aydın, H., & Çetin, C. (2020). Değer Akışı haritalama ile süreçlerin iyileştirilmesi: Yalın organizasyonda bir vaka çalışması 1. *Business and Economics Research Journal*, 11(2), 445-459.
- Başak, E. E., Yılmaz, İ. S., & Deniz, N. (2019). Endüstriyel ürün imalatı yapan bir işletmede yalın üretim uygulaması. *Endüstri Mühendisliği*, 30(3), 157-172.
- Birgün, S., Gülen, K. G., & Özkan, K. (2006). Yalın üretime geçiş sürecinde değer akışı haritalama tekniğinin kullanılması: İmalat sektöründe bir uygulama. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(9), 47-59.
- Çobanoğlu, S. (2011). *Yalın üretim sisteminin otomotiv sektöründe uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Efe, Ö. F. (2011). *Yalın hizmet/değer akışı haritalama: .bir acil serviste uygulanabilirliği* [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Ferreira, P. W., Armellini, F., de Santa-Eulalia, L. A., & Thomasset-Laperrière, V. (2022). Extending the lean value stream mapping to the context of Industry 4.0: An agent-based technology approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 1-14.
- Guleria, P., Pathania, A., Sharma, S., & Sá, J. C. (2022). Lean six-sigma implementation in an automobile axle manufacturing industry: A case study. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1739-1746.
- Hines, P., Rich, N. & Esasin, A.E. (1998). Creating a lean supplier network: A distribution industry case. *European Journal of Purchasing & Supply Management*, 4(4), 235-246.
- Kökten, E. S. (2021). *Değer akış haritalama yöntemi ile işletmelerde üretim kayıplarının azaltılması: Ahşap sektöründe bir uygulama* [Doktora tezi]. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Kuğu, S., & Köse, R. (2021). Isı değiştirici üretim hattında değer akış haritalama uygulamasının etkileri. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 135-146.
- Marchwinski, C. & Shook, J. (2007). Yalın Kavramlar Sözlüğü. *Optimist Yayınları*, Amerika.
- Rother, M., & Shook, J. (1999). Görmeyi öğrenmek: Değer yaratmak ve israfı ortadan kaldırmak için değer akışı haritalama. *Yalın Enstitü Yayınları*, İstanbul.
- Sarı, E.B. (2018). Üretim hattı tasarımında değer akış haritalama tekniğinin kullanılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (56), 67-81.
- Schroeder, A., Marchwinski C. & Shook, J. (2007). Yalın kavramlar sözlüğü. *Optimist Yayınları*, Amerika.
- Sedefoğlu, G. (2018). *Verimsiz bir üretim hattının AHP ve değer akışı haritalama ile iyileştirilmesi* [Yüksek lisans tezi]. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Seth, D. & Gupta, V. (2005). Application of Value Stream Mapping for Lean Operations and Cycle Time Reduction: An Indian Case Study. *Production Planning and Control*, 16, 44-59.

- Sevgili, A., & Antmen, Z. F. (2019). Yalın üretim tekniklerinden değer akış haritalandırmanın bir metal işleme fabrikasında süreç iyileştirme amacıyla uygulanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (16), 219-228.
- Soydan, N. (2020). Üretim için değer akışı haritalama. *Yalın Enstitü*, İstanbul.
- Şahin, B.D. & Akolaş, D. A. (2020). Yalın üretim yöntemlerinin incelenmesi ve otomotiv sektöründe bir uygulama. *Aksaray Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 12(4), 37-48.
- Yılmaz, E. (2012). *Siparişe göre üretim yapan sistemlerde yalın üretim uygulamaları* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TBSTR Eğitim Dokümanı. (2022). *TPS Yapısı ve Yalın Üretim*. Düzce.
- Tekin, M., Arslandere, M., Etlioğlu, M., Koyuncuoğlu, Ö., & Tekin, E. (2018). *Değer akışı haritalamasının büyük ölçekli bir işletmede uygulanması*. Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Zirvesi. İstanbul. 300-311.



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Istanbul Commerce University Journal of Science

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



Araştırma Makalesi / Research Article

İÇ MEKÂN TASARIMINDA RENK VE BİÇİMİN ETKİNLİĞİ*

THE ACTIVITY OF COLOR AND FORMAT IN INTERIOR
DESIGN

Elif Selin ATEŞ¹

Yaprak ÖZEL²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1133556>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
eselin.ates@istanbulticaretu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
22.06.2022

Kabul Tarihi / Accepted
25.10.2022

Öz

Bu çalışmada; iç mekânın tasarımı aşamasında kullanılacak biçimlerin renk tercihlerinin mekân içinde oluşturduğu etki ve algı üzerine incelemeler yapılmıştır. Tasarımcı, kullanıcı üzerinde uyandırmak istediği etkiye ve psikolojiye ulaşmak için malzeme, renk, doku ve biçim etkilerini kullanmaktadır. Kullanıcıya uygun tasarım yapmanın yanı sıra, tasarım aşamasında ilkesel bir yaklaşımı benimsemek başarılı kompozisyon çalışmalarının oluşmasına olanak sağlamaktadır. Renk ve biçim algısı subjektif etkiler oluşturduğu için kullanıcıya yönelik çalışmalar yapılması gerekmektedir. İç mimaride; konfor, estetik ve işlev gibi kullanıcıya yönelik temel kriterlerin elde edilmesi için kullanılan mobilyaların biçimsel ve renksel ilişkilerinin tasarım sürecinde doğru değerlendirilerek uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada; bir mobilyanın içinde bulunduğu mekân ile ilişkisi çerçevesinde; mobilyanın rengi, biçimi ve dokusu gibi etkenler ile kullanıcı üzerinde oluşan psikolojik etkinin incelenmesi esasına dayanmaktadır. Çalışma, Yüksek Lisans Tezi'nde yapılan çalışmalar ve taramalardan elde edilen veriler ile desteklenerek hazırlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biçim, iç mekân tasarımı, renk anlamları, renk psikolojisi.

Abstract

In this study; In this study, studies were made on the effect and perception of the color preferences of the forms to be used in the design phase of the interior. The designer uses the effects of material, color, texture and form to achieve the effect and psychology he wants to evoke on the user. In addition to designing suitable for the user, adopting a principled approach during the design phase allows the creation of successful composition works. Since the perception of color and shape creates subjective effects, it is necessary to carry out studies for the user. In interior architecture; In order to obtain basic user-oriented criteria such as comfort, aesthetics and function, the formal and color relations of the furniture used must be correctly evaluated and applied in the design process. In this study; within the framework of the relationship of a furniture with the space it is in; It is based on examining the factors such as the color, shape and texture of the furniture and the psychological effect on the user. The study is prepared by supporting the data obtained from the studies and scans in the Master's Thesis.

Keywords: Color meanings, color psychology, form, interior design.

*Bu yayın Elif Selin ATEŞ isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İç Mimarlık Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye.
eselin.ates@istanbulticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-8174-5837.

²Nişantaşı Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, İç Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye.
yaprak.ozel@nisantasi.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6439-4817.

1. GİRİŞ

İç mekân tasarımı; kullanıcının işlevsel ve estetik beklentilerine göre şekillenmektedir. Fonksiyonun ön planda tutulduğu bir tasarımda kullanılan renk ve form, kullanıcıya yönelik pozitif bir etki oluşturmaktadır. Benzer bir şekilde sadece estetik beklenti ön planda tutuluyorsa estetik beklentileri karşılayabilecek renk ve biçim seçimleri yapılmaktadır.

Tasarımda bu etmenlerin birbiri ile ilişkilendirilmeden uygulanması, kullanıcı beklentilerinin tam olarak karşılanamamasına sebebiyet verebilmektedir. Bu noktada beklentilerin tam karşılanabilmesi için gerekli tasarım ilkeleri doğru ilişkiler içinde kullanılarak, tasarımcının vermek istediği mesaj aktarılmalıdır. Dinamik bir tasarım elde edebilmek için renk, biçim, doku gibi seçimlerde aşırıya kaçılması mekân içinde bir kargaşaya neden olmaktadır. Kullanıcı ve tasarımcı arasındaki iletişim çerçevesinde alınacak uygulama kararlarının dikkatlice düşünülmesi ve seçilmesi gerekmektedir.

Renk ve biçim ilişkisi algılama üzerinde farklı etkiler oluşturabilmektedir. Bu nedenle, yeni bir tasarımda veya mevcut bir tasarımın yenilenmesi gibi işlemlerde, biçimin ön plana çıkması veya arka planda kalması tercihine bağlı olarak yapılmalıdır. Biçimin; büyük/küçük, uzak/yakın, ağır/hafif, sert/yumuşak gibi farklı etkilerle algılanması için renk kullanımı bir çözüm oluşturabilmektedir. Renk ve biçim arasındaki algı faktörü ortak bir mesaj içererek tasarım sürecinde birbirinden faydalanan iki ana etken olarak değerlendirilmektedir.

İnsanların renk ve biçimi yorumlama şekilleri değişkenlik göstermektedir. Bu durum yaşadıkları coğrafyaya, sahip oldukları inanışlara, kültürlere, gelenek ve göreneklere ve bunun gibi bireylerin kendini ait hissettiği belirli topluluklara göre değişmektedir. Geçmişten gelen inanışlarla birlikte insanların içinde bulunduğu dönemde karşısına çıkıp deneyimlediği davranışlar, renk ve biçime karşı farklı algıya sahip olmasına sebep olmaktadır. Yapılan değerlendirmelerin anlatılmak istenileni yansıtması için, biçim ve renk arasında birbirini destekleyen bir anlatım olursa tasarım ifadesi güçlenecektir. Bu durumda hangi biçimin hangi renk ile aynı duyguyu yansıttığını saptamak sürecin ilerlemesinde fayda sağlayacaktır.

2. RENK KAVRAMI

Renk ışığın, kendi öz yapısına ya da cisimlerden yansımaya bağlı olarak gözde oluşturduğu duyum anlamına gelmektedir. (Yıldız, 2006) Tarihin eski dönemlerinden bugüne sanat alanında renk kullanımı farklı boyutlarda incelenmiş ve oluşturduğu psikolojik etkiler hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Renk hakkında yapılan incelemeler sonucunda mimari akımlardan, çevre koşullarına, beklentilere, toplumların değer yargılarına ve kültürel farklılıklara kadar renklerin kullanımı, şekilleri ve anlamları değişkenlik göstermektedir.

Tarihsel Dönemlerde Renk: Eski Çağlar, Antik Dönem (Anadolu, Mısır), Yunan, Roma, Bizans, Selçuk ve Osmanlı Dönemi, Ortadoğu ve Asya dönemleri başlığı altında incelenmektedir. Mimari Akımlarda Renk: Orta çağ ve Gotik, Rönesans, Barok, Rokoko, Ampir, 18. ve 19. Yüzyıllar, 20. Yüzyıl (Art Nouveau, Fütürizm (1909), De Stijl (1917), Ekspresyonizm (1918), Pürizm (1918), Bauhaus (1919), Konstrüktivizm (1920), Brutalizm (1954), Post Modernizm (1972) başlıkları altında incelenmektedir. (Alakuş, 2009)

İç Mekân Tasarımında Dekorasyon Stilleri ise: Maksimalit Stili, Geçiş Stili, Fransız Stili, Country Stili, Stilsiz Dekorasyon, İskandinav Stili, Endüstriyel Stili, Yüzyıl Ortası Modern Stili, Rustik Stili, Eklektik Stili, Minimalist Stili, Çağdaş Stili ve Bohem Stili Dekorasyon olarak incelenmektedir. (Işıkoğlu, 2019)

Renk kavramı bazen bir duygu, bazen bir duyum bazen de bir algılama olarak ifade edilmektedir. Çünkürenge farklı açılardan bakmak mümkündür. Bunlar; fizyolojik renk, görsel renk ve psikolojide renk olarak değerlendirilmektedir. Rengin bir algı olduğundan yola çıkarak fizyolojik renkten bahsedilebilmektedir. Fizyolojik renk: rengin ışık ile görünmesi durumunu ifade etmektedir. Görsel renk: rengin görülmesi olayının ölçütlerle ifade edilmesi ve durum hakkında detaylı incelemelerin yapılmasına imkân oluşturmaktadır. (Ketenci & Bilgili, 2006) Renklerin ışıpta görünebilen dalga boyları gibi değerlendirmelere, görsel renk tanımı ile ulaşılabilir.

Psikolojide renk ise; bireyin rengi algılamasına bağlı olarak beyinde gerçekleşen bir etkidir. Kişinin renk algısında pek çok farklı etken bulunmaktadır. Beyin alışkın olduğu veya tanıdığı birtakım biçim ve renklere olan hâkimiyetini, yeni gördüğü biçim ve renkleri tanımlamak noktasında bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle her kullanıcının psikolojik renk algısı farklılık göstermektedir.

Renkteki psikolojik etkiler, tarihte mimari akımlar çerçevesinde, iç mekân tasarımında, kendini yenilemiş ve dönemin özellikleri arasında yer alacak farklı etkilere sebep olmuştur. Renk kullanımı kullanıcının kültürel birikimi, bulunduğu coğrafya, cinsiyeti, yaşı, mevki, ekonomik durumu gibi faktörlere bağlı değişiklik göstermektedir. Bu durum bireyde oluşan algılama farklılığından kaynaklanmaktadır. Küçük yaşlardan itibaren insanın hafızasında biriken bilgiler ve deneyimler sonraki süreçlerde karşılaştıkları durumlara karşı olumlu ya da olumsuz tepki göstermesine neden olmaktadır. Bu durum, renk algısı olarak tanımlanmaktadır. Renk algısının doğru değerlendirilmesi, doğru renk seçimlerini ve dolayısıyla oluşan tasarımda doğru etkilerin oluşmasını sağlamaktadır. (Aktürk, 2004)

Renklerin psikolojik etkileri genel olarak şu şekilde ifade edilebilmektedir.

Kırmızı Renk, 3 ana renkten biridir. Tamamlayıcı rengi yeşil renktir. Beyinde oldukça fazla miktarda uyarılmaya neden olan bir renktir. İştah açıcı ve hızlı yeme içme etkisi bulunmaktadır. (Şekil 1) Aynı zamanda çocuklarında sık sık tercih ettiği renktir. Kanakışını hızlandırmaktadır. Bu yüzden heyecan verici etkisi vardır. Arzu, aşk gibi duyguların ifadesinde kullanılması uygundur. Kullanım miktarının fazla olması rahatsız edici bir etkiye neden olmaktadır. Mavi rengin vurgusunu arttırmak için yanında kullanılabilir bir renktir. Çin'de gelinlik rengidir. (Maria, 2014) Avrupa'da cinsiyet olarak kadınların tercih ettiği renktir. Mısır'da kötülüğü temsil eden bir renktir. Antik Yunan için aşk rengidir. Anadolu'da sağlığın rengidir. Asya'da mutluluğu temsil etmektedir. Koyu tonu ciddiyeti, açık tonu ise nezaketi simgelemektedir. (Tuncay, 2006) Mekân içerisinde duvarda yakınlaştırmacı, döşemede güçlü, tavanda bunaltıcı etkiye neden olmaktadır. Dikkat çekici bir renk olması nedeninden dolayı biçimde daha az dikkat çekici bir tasarım yapılması faydalı olacaktır. Aynı anda iki yönden dikkat çeken bir biçim abartılı görünebilir. Mekan içerisinde de çok fazla kırmızı renk kullanımı kullanıcı için rahatsız edici bir etkiye neden olmaktadır.



Şekil 1. Günümüz Dünyasında Modern Kafe Tasarımı ve Önemi, (Concept İç Mimarlık)

Sarı renk, doğada bulunan 3 ana renkten bir diğeridir. Tamamlayıcı rengi mor renktir. Kandinsky'nin yorumuna göre sarı renk ekşi görünüme neden olmaktadır. (Şekil 2) Sarı ve sarıya yakın renkler sıcak renk olarak isimlendirilmektedir. (Bayramin, 2011) Kontrolsüz davranışa sahip insanların kullandığı bir renk olarak tarif edilmektedir.



Şekil 2. Wassily Kandinsky, Blue Segment, 1921

Sarı renk, iştahın açılmasına neden olan bir renktir. Çalışırken beyin hücrelerinin uyarılmasını sağlamaktadır bu da çalışma sırasında alınacak verimi arttıracak bir etkinin oluşmasına sebep olmaktadır. Dekoratif ürünlerin kullanımında tercih edilmesi önerilen bir renktir. Rengin yoğun kullanımı olumsuz duyguların oluşmasına yol açabilmektedir. Hristiyanlar için kutsal renk olarak ifade edilmektedir. Hindistan'da gelinlik rengi olarak kabul edilmektedir. Farklı tonlarda farklı etkilerinin olduğu görülmektedir. Canlı tonlarının daha dinamik, soluk tonlarının ise rahatlatıcı etkisi bulunmaktadır. (Jones, 2009) Sarı, güçlü hafızayı temsil eden bir renktir. Mekân içerisinde duvarda kışkırtıcı, döşemede güçsüz, tavanda canlandırıcı etkiye neden olmaktadır. Kafe, restoran gibi yeme içme mekânlarında kullanılması önerilen bir renktir. Düz çizgilerden ve sade bir görünüme sahip biçimdeki mobilyaya sarı renk dinamik bir izlenim kazandırmaktadır. Enerji verici etkiye sahip bu rengin spor salonu gibi aktif mekanlarda kullanılması da oldukça doğru bir seçim olmaktadır.

Yeşil renk, umudu temsil eden bir renktir. Soğuk renk grubunda yer almaktadır. Mavi ve sarı rengin birleşmesi ile meydana gelen ara renktir ve iki renginde özelliğini taşımaktadır. Huzur veren dinlendirici bir etkiye sahiptir. Verimliliği çağrıştırır, motivasyonu artırır. Gözü yormayan bir renktir. Avrupa'da, erkeklerin sevdiği bir renktir. Çin'de olumsuz duyguları ifade eden bir renktir. İsrail'de kötü haber anlamına gelmektedir. Suudi Arabistan'da zenginliği ifade etmektedir. İngiltere'de hızın sembol rengidir. İslam dininde kutsallığı temsil etmektedir. (Soyguder, 2007) Mekân içerisinde duvarda kaplayıcı, döşemede sakinleştirici, tavanda güven verici etkiye neden olmaktadır. Mekanda doğal bir etki oluşturması için yeşil renk tercih edilmektedir. Boyut olarak küçük biçimdeki bir mobilya yeşil renk kullanılarak daha büyük görünmektedir.

Mavi renk, 3 ana renkten biridir. İştah kesen bir renktir. Sakinleştirici etkisi de vardır. İngiltere'de gelinlik rengidir. Avrupa'da, erkeklerin sevdiği renktir. Yunanistan'da önemsenmeyen bir renktir. İran'da keder anlamına gelmektedir. Fransa'da adaleti temsil etmektedir. Mekân kullanımında diğer renkler ile uyumlu bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Mekân içerisinde duvarda hissiz, döşemede çağrıcı, tavanda hayalperest etkiye neden olmaktadır. Islak alanda mobilyalarda kullanılması önerilen bir renktir. (Rasmussen, 2010) (Şekil 3) Uyuma alanlarında nevresim kullanımında önerilmeyen bir renktir. Sağlıklı uyku için doğru bir renk değildir. Resmi kıyafetlerde ve üniformalarda koyu tonları tercih edilmektedir. Kararlılık, ciddiyet ve güven etkisi vermektedir. Dekoratif ürünlerde kullanılması daha doğru bir tasarım tercihi olacaktır.



Şekil 3 Banyo Tasarımında Renk Kullanımı (DK İç Mimarlık, 2020)

Mor renk, kırmızı ve mavi rengin karıştırılması ile meydana gelen bir ara renktir. Cesareti temsil eden bir renktir. Fazla kullanımı olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bireyde depresif duyguları ortaya çıkaran bir renktir. Fransa'da yası temsil etmektedir. Avrupa'da yaşlılığı sembolize etmektedir. (Gülşen, 2021) Uyuma alanlarında uyku kaçırıcı etkisi gözlemlenmektedir. Fazla kullanıldığı mekânlarda korkutucu bir etkiye de neden olmaktadır. Mekanların antre bölümünde kullanılması tavsiye edilen bir renktir. Asaleti temsil etmektedir. Mekân içerisinde duvarda küçültücü, döşemede dengesiz, tavanda bunaltıcı etkiye neden olmaktadır. Mavi rengin modern görünmele ilgili bir algısı bulunmaktadır. Modern çizgilerden oluşan biçim mavi renk ile

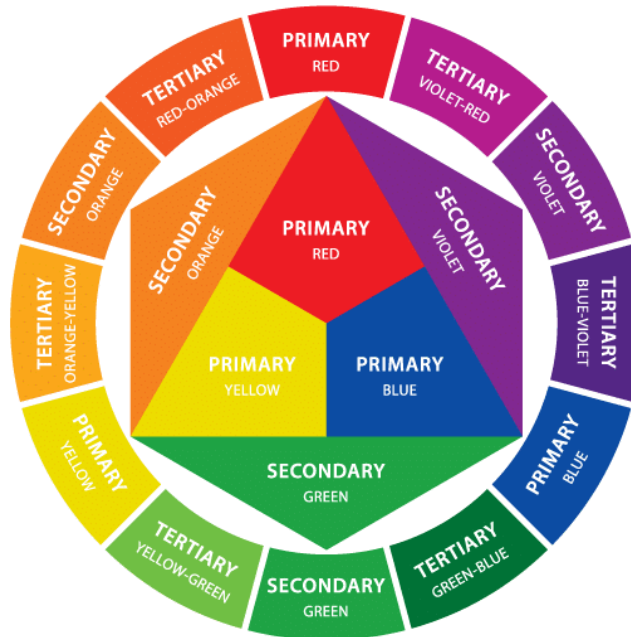
tamamlanabilir. Soğuk renk gruplarında yer aldığı için biçim üzerinde daha büyük algılamaya sebep olmaktadır.

Beyaz rengin diğer renklerden farklı şekilde oluşmaktadır. Objeye üzerinde tam yansıyan renk beyaz renk olarak adlandırılmaktadır. Anadolu’da yaşlılık anlamında kullanılmaktadır. Mekân içerisinde fazla kullanımı sıradanlaşmış bir etki yaratmaktadır. (Causse & Causse, 2019) Aydınlatıcı bir etkiye sahiptir. Temizliği temsil eden bir renktir. Mekanlarda ıslak hacimler için uygun bir renk seçimidir. Mekân içerisinde duvarda ferahlatıcı, döşemede dokunulmaz, tavanda ferah etkiye neden olmaktadır. Beyaz rengin sadeliği biçimi daha net ifade etmek için kullanılmaktadır. Mekan tasarımında biçimi ortaya çıkarmak için bu renk tercih edilmektedir.

Siyah renk, beyaz rengin zıt rengidir. Işıksızlık olarak da adlandırılmaktadır. Yatak odası mobilyalarında kullanımı önerilmemektedir. Sakinleştirici bir etkiye sahiptir. Bireyde kendini suçlu hissetme etkisine neden olmaktadır. İspanya’da gücü temsil eden bir renktir. Avrupa’da yas rengi olarak tanımlanmaktadır. Yunanistan’da melankoli rengidir. (Pastoureau, 2016) Mekân içerisinde duvarda sıkıcı, döşemede kaygılandırıcı, tavanda sansasyonel etkiye neden olmaktadır. Biçimin daha küçük algılanmasını sağlayan siyah renk büyük mekanlarda mekanın daha küçük algılanması için kullanılmaktadır. Mobilya üzerinde de bu algıdan dolayı zarif görünümü sağlamak için tercih edilmektedir.

Kahverengi devamlılığı ifade eden bir renktir. Güvenilir bir etki oluşturmaktadır. Ciddiyeti simgelemektedir. Diğer renkler ile bir arada kullanılması rengin ağırlığını hafifletici bir etki sağlamaktadır. Japonya’da doğallık, Avusturya’da toprak elementini, Hindistan’da matemi temsil etmektedir. (Hashempour & SapchI, 2015) Mekân içerisinde duvarda sağlam, döşemede durgun, tavanda bunaltıcı etkiye neden olmaktadır. Mekânda daha az kalmayı teşvik eden bir etkisi vardır. Oturma ve yatak odalarında kullanımı önerilen bir renktir.

Pembe renk, sevgiyi temsil eden bir renktir. Kırmızı ve beyaz rengin karıştırılması ile elde edilmektedir. Aynı zamanda ferahlık hisside oluşturmaktadır. Avrupa’da kızların sevdiği renktir. Sinirleri düzenleyici etkisinden de söz edilmektedir. (Causse & Causse, 2019) Duvarlarda kullanımı önerilmektedir. İştah açıcı bir etkiye neden olmaktadır. Mekân içerisinde duvarda sıkıcı, döşemede naif, tavanda geçici etkiye neden olmaktadır.



Şekil 4, Renk Teorisi ve Duygular, (UA Creative Agency, 2017)

Turuncu renk kırmızı ve sarının karıştırılması sonucu oluşan ara renktir. (Şekil 4) İyimserlik hissini ortaya çıkaran bir renktir. Hareketi temsil eden bir renk olduğu için spor salonlarında kullanımı önerilmektedir. Mavi rengin tamamlayıcısı bir renktir. Çin’de ve Akdeniz’de sevgiyi temsil etmektedir. (Özdemir , 2005) Mekân içerisinde duvarda samimi, döşemede enerjik, tavanda basık etkiye neden olmaktadır. Çocuk odalarında, dinlenme alanlarında, kafelerde kullanılması önerilen bir renktir. Mekânda uyarıcı etki oluşturmaktadır. Dinamik bir renk olduğu için etkinin artmasına yönelik eğimli biçimlerde kullanılabilir.

Renklerin genel olarak mimari kullanımda tercih edilme sebepleri, özellikleri ve psikolojik etkileri aktarılmıştır. Varılan sonuçlar ışığında, tasarımda oluşacak veya oluşturulacak etkiler noktasında biçimin de üstleneceği rolün etkinliği nedeni ile biçim başlığının da detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir. Biçim ve renk arasındaki ilişkinin özümsemesi için biçim ve özellikleri de detaylandırılmaktadır.

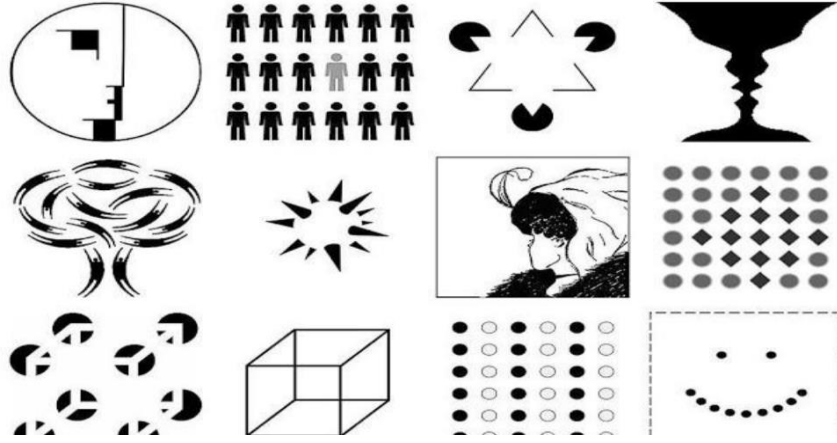
3. BİÇİM

Biçim; nokta, çizgi, yüzey ve hacim elemanlarından oluşan şekiller olarak adlandırılmaktadır. Biçimin bir diğer ismi formdur. Biçim kendi arasında iç ve dış biçimler, pozitif ve negatif biçimler, statik ve dinamik biçimler, kapalı ve açık biçimler, somut ve soyut biçimler olarak çeşitli gruplara ayrılmaktadır. Kandinsky biçim hakkında yaptığı çalışmalarda dairesel form ile soyutlamalar üzerinde ilerleyerek biçimin farklı bakış açısıyla inceleyen sanatçılardan biridir. (Kandinsky, 2009)

Psikolojik bir teori olan Gestalt, bilişsel süreçler içerisinde özellikle biçimin algılanması ve algısal örgütlenme konularında yoğunlaşmıştır. Gestalt, Almanca ’da form anlamına gelmektedir. Gestalt ilkeleri Yakınlık İlkesi, Kapalılık (Tamamlama) İlkesi, Devamlılık İlkesi, Benzerlik İlkesi, Simetri İlkesi, Yönelim İlkesi, Şekil – Zemin İlkesi olarak sınıflandırılmaktadır. Bu ilkeler biçimin şekillenmesinde tasarıma fayda sunan eylemleri gruplandırmak amacıyla oluşturulmuştur. Biçimin özellikleri göz önünde bulundurularak hangi ilkeye göre hareket edildiği ve nasıl bir biçim olduğu tanımlanırken belirtilen ilkelere dayanılmaktadır.

Biyomimikri, temel olarak doğadaki canlılardan model, sistem olarak çözüm üreten, ürün ve malzemelerin tasarımını ifade eder, doğa unsurlarının taklididir. Doğadaki canlıların hareketleri ve bedensel özelliklerinin sadeleştirilerek biçimlere uyarlanması ile oluşturulmaktadır. Biçimin oluşturulması sonucunda ortaya çıkan objenin, nesnenin insanda psikolojik etkilere neden olduğu bilinmektedir.

Bu etkiler biçimsel algı kavramını ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 5 Biçim Algısı (China Design Centre,2009)

Biçimsel algı sonucu yapılan değerlendirmeler ile biçimsel etki meydana gelmektedir. Biçimin şekli ile kullanıcı arasında psikolojik bir etki süreci işlemektedir. (Şekil 5) Kullanılan şeklin doğrusal ya da eğimli olması, dik ya da dairesel olması, büyük ya da küçük olması, geniş ya da dar olması gibi birçok etken biçimin farklı algılanmasına ve dolayısıyla farklı etkiler oluşturmaya neden olmaktadır. (Aslan ve ark., 2015) Biçimin, mekân içinde olduğundan uzakta ya da yakında algılanabilmesi gibi, biçim üzerindeki şekillerin sivri ya da eğimli olması biçimin daha konforlu, daha elastik ya da daha ağır olduğuna dair bazı tefsirlerin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu yorumlar bazen gerçeği yansıtmayacak şekilde değişkenlik gösterebilmektedir. Bu da biçimin tasarımda psikolojik etkilerinin ne kadar üst boyutta olduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 6 Biçimin Oluşması (Zhang Zhoujie, 2009)

Biçimin oluşturulma amacı işlevsellik ise konforlu ya da dayanıklı olması gibi faktörlere göre şekillenmesi daha doğru olacaktır. (şekil 6) Ancak biçim sadece estetik amaçla kullanılacak ise oluşturulması aşamasında seçilecek malzemenin dayanıklılığı estetik etkisinin gerisinde kalabilmektedir.

Biçimin uzun yıllar kullanılması sadece nesnenin dayanıklı olmasına bağlı bir etken değildir. Çünkü bir nesnenin dayanıklı olması onu uzun yıllar kullanmak için bazen yeterli bir sebep olmayabilmektedir. Bir biçim, uzun yıllar kullanabilmek gibi olumlu bir etkisinin yanında, dönemin koşullarına göre ergonomik ve ekonomik olmama, fazla yer kaplama gibi birçok olumsuz özelliğe de sahip olabilmektedir. Bir nesneyi faydalı olarak görmek için ise olumlu yönlerinin olumsuz yönlerinden fazla olması gerekmektedir. Bu durumda biçimin zamana karşı algılanmasında da farklı faktörler devreye girmektedir.

4. BİÇİM VE RENK İLİŞKİSİ

Biçim ve renk kavramları tasarımda kullanılan iki önemli faktör olarak değerlendirilmektedir. Anlamsız bir biçim veya yanlış kullanılan bir renk bütün tasarımın olduğundan farklı şekilde algılanmasına neden olabilmektedir. Bu yanlış algılama süreci, tasarımı istenilmeyecek bir boyuta sürükleyebilmektedir. Doğru tasarım tercihlerini yapmak, renk ve biçim uyumu ile mümkün olabilmektedir. Biçim ile renk arasında algısal bir ilişki görülmektedir. Şekillerin çeşitleri, hacmin yapısı, noktaların hizalanması gibi farklı seçimler biçimin farklı algılanmasına neden olmaktadır (Aktürk, 2004). Kullanıcının hafızasında önceden farklı bir anlam olarak kaydedilen biçim ile tekrar karşılaşması bile algısını etkilemekte ve önceden kaydedilenden farklı bir algılama oluşabilmektedir. Kültürel, inançlar, ulusal, sosyolojik etkiler, coğrafik yapı, doğa şartları gibi birçok farklı etmen kullanıcının hafızasında oluşacak renk algısı sürecini etkilemektedir. Bu yüzden renk ve biçim seçimi aşamasında kullanıcının etkin bir rolü bulunmaktadır.

Aynı renkteki iki farklı biçim üzerinde yapılan incelemelerde; biçimde kullanılan çizgilerin doğrultusu ilk incelenecek noktalardan biridir. Eğer bir objenin, nesnenin ya da mobilyanın biçimi dairesel formda ise kullanıcıya karşı genel olarak hissettirdikleri daha konforlu, samimi ve kullanışlı olduğudur. Bahsi geçen biçimin sert ve keskin çizgileri varsa bu durumda algı daha ciddi, rahatsız, net ve keskin olarak değişmektedir. Bu biçimlerden birinin diğerine göre daha güvenilir veya daha ağır hissettirme gibi algılama farkları da olabilmektedir. Aynı renkteki biçimler aynı mesafede olmasına rağmen daha uzak, ağır ve derin algılanabilmektedir. Aynı iki biçimin farklı renkleri arasında bir seçim yapıldığında daha konforlu algısı veren renkteki biçimin seçildiği görülmektedir. Ya da koyu tondaki biçimin daha yakın algılanması, daha büyük ya da daha ağır algılanması şeklinde yorumlarda yapılabilmektedir. Bir biçimin rengi kullanıcıda hem duygusal olarak psikolojik etkiler oluşturmada hem de farklı algılamaların oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu durumda bir mekânda biçimin ağırlığını arttırmadan kullanıcıya daha ağır ve ciddi ortamlar tasarlamak renk kullanımı ile mümkündür. Tasarımcının küçük bir mekânı yansıtıcı dekoratif elemanların derinlik etkisinden faydalanarak hacmi geniş ve büyük gösterebileceği gibi, renk seçimleri ile daha ferah bir ortam algısı sağlaması mümkündür. Mekân içinde kullanılan mobilyaların renk seçimleri de mekân yüzeyinde kullanılan renklerin algılanmasındaki gibi farklılıklar gösterebilmektedir.

5. SONUÇ

İnsan psikolojisi, somut durumları soyut durumlarla karıştırılabilmeye müsait bir yapıdadır. Çevresel etkiler, çocukluktan gelen alışkanlıklar, kişiye özel düşünce yapısı, algılama gibi faktörler psikolojinin değişkenliğini ortaya çıkaracak kavramlardır. Jean-Gabriel Causse'nin 'Renklerin Şaşırtıcı Gücü' adlı kitabında yapılan incelemelerde rengin birçok alanla ilgili ve etkilenebilir özelliklerinin olduğu gözlemlenmektedir. Aynı şekilde Beyza Onur'un 'İskandinav Mimarlığında Estetik: Plastik ve Anlamsal Biçim Analizi' adlı Yüksek Lisans Tez'inde de biçim için tasarımda çok sayıda farklı algısal etkilere sebep olduğu ile ilgili bilgilere ulaşılmaktadır.

Fiziksel güç dışında psikolojik güç ile daha az çaba sarf edilerek daha fazla etki oluşturmak mümkündür. Biçim ve renk algısında insanın psikolojik yapısındaki farklılıklar göz önünde bulundurulmadan çeşitli genel saptamalarda bulunmak veya değerlendirmeler yapılabilmektedir. Fakat tıpkı uluslara göre değişen renklerin anlamları, dinlere göre renklerin ifadeleri gibi belirli başlıklar altında renk algısı incelenmelidir.

Biçim ve renk kullanımı algısal etkiler sonucu meydana gelen somut bir ifadedir. Genel olarak insanların renklere verdiği tepkilere bakılarak renkler hakkında sınıflandırma yapma durumu, biçim ve renk üzerinde de gerçekleştirilebilmektedir.

Tasarım aşamasında tasarımcının kullanıcıyı anladığı nokta ile algısal etkilerini saptadığı noktanın aynı olması hedeflenmektedir. Bu durum aynı olduğu sürece biçim ve renk arasındaki algısal ilişkiyi kurmak mümkündür. Yani bir çocuk odası tasarlanırken çocuk özelindeki algıya göre seçimler yapılmalıdır. Ya da dairesel formun oluşturduğu konfor algısını reddeden bir kullanıcıya ısrarla dairesel formda bir oturma elemanı sunmanın bir anlamı olmayacaktır. Bu şekilde tasarımcı biçimde mutabık kalıp renk seçimi ile konfor etkisini kullanıcıya sunabilmektedir.

Bu durumda tasarım sürecinde kullanıcının beklentilerini anlamak öncelikli amaç olmalıdır. Daha sonra biçim özelliklerinin renk ile arasındaki ilişkileri tespit edilerek duruma göre biçim ve renk değişikliği yapılabilir. Bu yöntem; tasarımda hızlı hareket edebilme, kolay çözüm üretme ve avantajlı durumları iyi değerlendirme gibi faydalar sağlamaktadır.

Aynı biçim üzerindeki renk değişikliği sonucunda algının farklılaşması, rengin ne kadar güçlü bir tasarım faktörü olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Biçimin ifadesini renkle güçlendirmek doğru renk tercihleri ile mümkündür. Tasarımda biçim ve renk konusunda uygun seçimler yapmak anlaşılabilir bir tasarım oluşmasını sağlamaktadır. Bu durumda renk ve biçim birer mesaj olarak kullanıcıya iletilmektedir ve kullanım amacına hizmet etmektedir.

Yazarların Katkısı

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

Teşekkür

Yazarlar çalışmada kullanılan verilerin temini için Türkiye Yüksek Öğretim Kurulu Tez Merkezi'ne teşekkürlerini sunar.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Aktürk, E. (2004). *Resim sanatında renk-içerik, form-içerik ilişkisi* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir.
- Alakuş, Y. Z. (2009). *Renk olgusu ve günümüz mimarisindeki yeri* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aslan, F., Aslan, E., & Atik, A. (2015). İç mekânda algı. *İnönü Üniversitesi Sanat ve Tasarım Dergisi*, 139-151.
- Bayramın, İ. (2011). *Wassily Kandinsky'nin sanat tanımı* [Yüksek lisans tezi]. Işık Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- Causse, G., & Causse, J. (2019). Renklerin şaşırtıcı gücü. *Pegasus Yayınları*, İstanbul.
- Gülşen, P. (2021). Renkler: Tarih - Kültür - Sanat - Psikoloji. *Destek Yayınları*, İstanbul.

- Hashempour, L., & SapchI, A. (2015). Okul kütüphanelerinde renk etkileri ve önemi. *Milli Eğitim, İstanbul*, 51-60.
- Işıkoğlu, B. O. (2019). İskandinav Mimarlığında estetik: Plastik ve anlamsal biçim analizi. *Journal of History Culture and Art Research*, 8(3), 465-479.
- Jones, S. J. (2009). Moda tasarımı. *Güncel Yayıncılık*, İstanbul.
- Kandinsky, W. (2009). Sanatta zihinsellik üstüne. *Hayalperest Yayınları*, İstanbul.
- Ketenci, H. F., & Bilgili, C. (2006). Yongaların 10000 yıllık gizemli dansı görsel iletişim & grafik tasarımı. *Beta Basım Yayın*, İstanbul.
- Özdemir, T. (2005). Tasarımda renk seçimini etkileyen kriterler. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 391-402.
- Pastoureau, M. (2016). Siyah bir rengin tarihi. *Sel Yayıncılık*, İstanbul.
- Rasmussen, S. E. (2010). Yaşanan mimari experiencing architecture. *Remzi Kitapevi*, İstanbul.
- Soygüder, Ş. (2007). Renk ve algı psikolojisi. *Fotoğrafya*, İstanbul.
- Tuncay, S. (2006). *Mimarlık ve renk kavramı* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yıldız, S. (2006). Renk sistemlerine genel bir bakış: Renk ve algı. *Bilim Teknik Dergisi*. Ekim, 72-75.



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

Istanbul Commerce University Journal of Science

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



Araştırma Makalesi / Research Article

AYDINLATMA SİSTEMLERİNİN YENİLENME GEREKSİNİMLERİ*

RENEWAL REQUIREMENTS OF LIGHTING SYSTEMS

Faruk UYAN¹

Alpin KÖKNEL YENER²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1215095>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
uyan@itu.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
07.12.2022

Kabul Tarihi / Accepted
22.12.2022

Öz

Aydınlatma teknolojisinin tarihsel gelişimine bakıldığında, ışık kaynaklarının verimliliği ve yaşam ömrünün sürekli olarak geliştirildiği görülmektedir. Bu durum, binalarda kullanılan eski teknolojiye sahip ışık kaynaklarının veya bu kaynaklar ile tasarlanmış ve uygulanmış mevcut aydınlatma sistemlerinin yenilenme çabasını beraberinde getirmektedir. Ancak bu yenileme eylemi, teknolojinin hızına yetişmeye çalışan bir telaş ile değil, kurallı ve tanımlı bir proje süreci ile gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada, mevcut aydınlatma sistemlerinin yenilenme sürecine ilişkin oluşturulması gereken bir proje yaklaşımının ilk ayağı olan, yenilenme gereksiniminin değerlendirilmesi aşaması ile ilgili konular irdelenmektedir. Mevcut aydınlatma sistemleri çeşitli sebepler ile yenilenmeye gereksinim duyabilmektedir. Bu sebepler çalışmada, kullanıcı konforu ile ilgili gereksinimler, enerji tüketimi ile ilgili gereksinimler, çevresel konular ile ilişkili gereksinimler, yaşam ömrü ve teknoloji ile ilgili gereksinimler olarak ele alınmıştır. Bu konular ile ilgili güncel standart, yönetmelik ve literatür derlenmiştir. Ayrıca gerek Covid-19 pandemisinin sosyal yaşantımıza getirdiği değişimler, gerekse küresel çevre hedeflerinin de sonucunda ortaya çıkan gereksinimlere yer verilmiştir. Çalışma, bir mevcut aydınlatma sisteminin yenilenmesi gereğinin değerlendirilebileceği ilgili konular ve güncel bilgileri bünyesinde içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Aydınlatma, enerji etkinliği, konfor şartları, Retrofit, yenileme.

Abstract

In the historical development of lighting technology, it has been tried to continuously improve the efficiency and life span of light sources. Today, LED technology are much more efficient than many previously used technologies. Therefore, there is an effort to renew the existing lighting systems designed and applied with these old technology light sources. However, this renewal operations should be carried out with a regular and defined project process, not with a rush trying to keep up with the speed of technology. In this study, the topics related to the evaluation phase of the renewal requirement, which is the first step of a project process that should be created on the renewal of existing lighting systems, are examined. Existing lighting systems may need to be renewed for various reasons. These reasons are discussed in the study as requirements related to user comfort, energy consumption, environmental issues, life-cycle issues, and technology-related requirements. Current standards, regulations and literature on these subjects have been compiled. In addition, both the changes brought by the Covid-19 pandemic to our social life and the needs that emerged as a result of global environmental goals are included. The study includes relevant topics and up-to-date information on whether an existing lighting system needs to be renewed or not.

Keywords: Comfort requirements, energy-efficiency, lighting, renewal, Retrofitting.

*Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde yapılan doktora tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye.
uyan@itu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-0948-9186.

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye.
yener@itu.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-6452-4650.

1. GİRİŞ

Bina aydınlatma sistemleri, enerji tüketimleri bakımından binalarda kullanılan sistemler arasında önemli bir yere sahiptir. Aydınlatma sistemleri, tüm bina sistemlerinin tükettiği enerji miktarının ortalama %20'si kadarını tüketmekte (IEA, 2021) ve binalar da dünya genelindeki enerji tüketiminin %34'ünden sorumludur (Global Alliance for Buildings and Construction, 2020). Bu iki verinin birlikteliği, bina aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimlerinin tüm dünyadaki enerji tüketiminin %6,8'lik bir bölümünü oluşturduğunu göstermektedir. Bu bağlamda aydınlatma enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmaların, dünya ölçeğindeki önemi ve küresel enerji tüketiminin azaltılmasına etkisi ortadadır.

Özellikle dünyadaki ve ülkemizdeki 2030 - 2050 çevresel hedefleri ile uyumlu olacak şekilde yeni yapılarda enerji etkin aydınlatma sistemlerinin tasarlanması gerekliliği kadar, mevcutta var olan aydınlatma sistemlerinin enerji etkin olarak yenilenmeleri gerekliliği de ortaya çıkmıştır. Bu durum beraberinde, bina aydınlatma sistemlerinin yenilenmesi sürecine dair bilimsel yöntemlerle hazırlanmış ve sektör pratiğine uygun bir rehberi de gerekli kılmaktadır.

Aydınlatma sistemlerinin yenilenmesi sürecini tanımlayacak bir süreç rehberinin ilk aşaması, sistemin yenilenme gereksiniminin değerlendirilmesidir. Bu çalışma ile amaçlanan, söz konusu yenileme gereksiniminin değerlendirileceği konuların derlenmesidir.

Çalışmada, mevcut aydınlatma sistemlerinin yenilenme gerekliliği şu konular üzerinden irdelenmiştir; sistemlerin kullanıcı konforuna cevap verebilme kabiliyetlerinin yeterliliği, enerji tüketimlerinin minimize edilebilme potansiyelinin varlığı, çevresel etkilerinin değerlendirilmesi ve zamana bağlı olarak hem kullanım hem de bakım olanaklarının sürekliliği. Ayrıca gerek geride bıraktığımız Covid-19 pandemisi, gerekse önümüzdeki yıllarda öngörülen iklim ve enerji krizi ihtimalleri ile ilgili konulara da değinilmiştir.

Çalışma genelinde ele alınan aydınlatma sistemleri yenileme gereksinimleri Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Aydınlatma sistemlerinin yenilenme gereksinimleri

Yenileme Gereksinimi	İlişkili olduğu konular
Kullanıcı konforu	Görsel konfor şartlarının sağlanması Mevcut sistemin kullanıcılarının memnuniyeti
Enerji tüketimi	Kurulu güç değerlerinin uygunluğu Aydınlatma kontrol sistemlerinin durumu Aydınlatma sisteminin, diğer bina sistemlerine etkisi
Çevresel konular	Sera gazı salımı miktarı Sistem bileşenlerinin geri dönüşüm ve atık planları
Yaşam ömrü ve Teknoloji	Sistemin ve bileşenlerinin yaşam ömürleri Mevcut ürünlerin teknolojilerinin eskimesi Güncel teknolojiye uyum sağlama
Trend ve direktifler	Yakın gelecekte bazı bileşenlerin bulunamayacak olması Global enerji hedefleri

2. KULLANICI KONFORU İLE İLİŞKİLİ YENİLEME GEREKSİNİMLERİ

Konfor durumu, fizyolojik açıdan insanın çevresine minimum düzeyde enerji harcayarak uyum sağlayabildiği ve psikolojik açıdan çevresinden hoşnut olduğu koşullar takımı olarak tanımlanabilir. Bina içinde konfor koşullarının gerçekleştiği durumlarda insanın fizyolojik, fiziksel ve entelektüel performansı maksimum düzeye erişir (İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu, 1995). Gerek aydınlatma ile ilgili standartlar gerekse mesleki kurumların (CIE, IESNA gibi) teknik çalışmaları, bazı görsel konfor şartları tanımlamaktadır. Bu görsel konfor şartları en temel haliyle aydınlık düzeyi, renksel geriverim değerleri, kamaşma değerleri ve mahaller için gerekli olan aydınlığın eş dağılım değerleridir. Aydınlatma sistemlerinin temel görevi olan görsel konfor gereksinimlerinin karşılanması; sürdürülebilirlik, enerji korunumu ve çevreye daha az zarar vermek adına göz ardı edilmemeli, işleve bağlı olan bu gereksinimlerin gerçekleştirilmesi öncelikli olarak sağlanmalıdır.

Bir aydınlatma sisteminin, temel işlevi olan görsel konfor şartlarını sağlayamıyor olması, o sistemin yenilenmesini veya iyileştirilmesini gerektirecek en önemli sebeplerdendir.

2.1. Görsel Konfor Şartları İle İlgili Gereksinim

Binalarda kullanıcılar için görsel konfor şartları Türkiye’de de kabul edilen TS EN 12464-1 ve TS EN 12464-2 nolu Avrupa Birliği standartları ile belirlenmiştir. İç mekanlar için olan standart 2021 yılında güncellenmiştir (TS EN 12464-1:2021, 2021). Standartın yeni yayını, eskilerinden farklı olarak, bir mahaldeki görsel konfor şartlarını tanımlarken, aydınlık düzeyi gereksiniminin değişebileceğini belirtmektedir. Bu değişime sebep olacak etkenler şunlardır;

- Görsel işin önemli olması,
- Potansiyel hataların düzeltilmesinin maliyetli olması,
- Yapılan işte hassasiyet, daha yüksek üretkenlik veya yüksek konsantrasyonun büyük önem taşıması,
- Görev ayrıntılarının alışılmadık şekilde küçük boyutlu veya düşük kontrastlı olması,
- Görsel görevin alışılmadık derecede uzun süreli olması,
- Görev alanının düşük gün ışığına sahip olması,
- Çalışanın görme kapasitesi normalin altında olması.

Bir mahalde yukarıdaki etkenlerden 1 veya 2 tanesi bulunuyorsa, standartta o mahal için verilen en düşük aydınlık düzeyi limiti 1 kademe üste, ve eğer bu etkenlerden ikiden fazlası bulunuyorsa, aydınlık düzeyi limiti 2 kademe üste çekilmelidir. Öte yandan eğer mahalde gerçekleştirilecek görsel görev ayrıntıları alışılmadık derecede büyük veya yüksek kontrastlı ise veya görev alışılmadık derecede kısa süreli ise, aydınlık düzeyi limiti bir kademe düşürülebilir notu düşülmüştür.

Aydınlatma standardındaki bu güncelleme, mevcut mahallerin aydınlatma sistemlerinin yeterlilik ve uygunluğunun yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

2021 yılında güncellenen aydınlatma standardında aşağıdaki görsel konfor şartları ile ilgili değerler tanımlanmıştır;

(\bar{E}_m , required) Ortalama aydınlık düzeyi (gerekli olan): Aydınlık düzeyi, bir alan üzerine gelen ışık akısının o alana oranı olarak tanımlanır (TS EN 12665, 2019). Bu kriter, bir mekan için gerekli olan en düşük ortalama aydınlık düzeyini belirtmektedir.

(\bar{E}_m , *modified*) Ortalama aydınlık düzeyi (değiştirilmiş): Bu kriter, belirtilen etkenler sebebiyle değiştirilmiş (yükseltilmiş) olan ortalama aydınlık düzeyini belirtmektedir.

(U_o) Aydınlığın düzgün dağılımı: Bir yüzeydeki minimum aydınlığın ortalama aydınlığa oranı (TS EN 12665, 2019).

(R_a) Renksel geriverim değeri: Bir ışıklayıcının, aydınlattığı nesnelerin, renk türü ile ilgili görünüşleri üzerindeki etkisi. Bu etki, bilinçli ya da bilinçsiz olarak, bir referans ışıklayıcısınınca aydınlatılma durumundaki renk türü görünüşleri ile karşılaştırılır (Sirel, 2012).

($RUGL$) Kamaşma: Işıklılıkların uygun olmayan dağılımları ya da aşırı bir karşıtlık sonucu, nesnelerin ya da bunların ayrıntılarının ayırdedilmesinde bir yetenek eksikliği ya da bir güçlük, bir sıkıntıya yol açan görme koşulları (Sirel, 2012).

(\bar{E}_m,z) Görsel iş bölgesinde silindrsel aydınlık: Belirtilen noktada bulunan çok küçük bir silindirin kavisli yüzeyine düşen toplam ışık akısının silindirin kavisli yüzey alanına oranı (TS EN 12665, 2019).

($\bar{E}_m,wall / \bar{E}_m,ceiling$) Yüzeyler üzerindeki aydınlık: Duvar ve tavanlardaki aydınlık, yüzey yansımaları ile birlikte ışıklılığa katkıda bulunur ve algılanan oda parlaklığının göstergeleridir (TS EN 12464-1:2021, 2021).

2.2. Kullanıcı Memnuniyeti İle İlgili Gereksinim

Her ne kadar standartlar ve kurumların teknik çalışmaları bazı sınır değerleri şart koşsa da, yapılan çalışmalarda aydınlatma aygıtlarını kontrol edebilen kullanıcıların sınır değerlerden daha düşük aydınlık düzeyini tercih ettikleri de görülebilmektedir (Stiller, 2012). Michael Stiller, standartlar ile belirlenen aydınlatma gereksinimlerinin son yüzyılda önemli değişiklikler gösterdiğini açıklamaktadır. Aydınlik düzeyi şartları, çeşitli ekonomik ve politik değişimler, çalışma ortamlarının gereksinimlerinin değişimleri, teknolojik değişimler ve kültürel değişimlerle birlikte zaman içerisinde değişimler göstermiştir. 1930’larda flüoresan ve gaz deşarjlı lambaların kullanımı ile birlikte çalışma alanlarında yüksek aydınlık düzeyi elde etmenin maliyeti (daha eski dönemlere kıyasla) düşmüş ve sonucunda aydınlık düzeyi standartlarında daha yüksek değerler hedeflenmiştir. 1970’lerdeki enerji krizi beraberinde, bu aydınlık düzeylerinin düşük düzeylere çekilmesi kararlarını getirmiştir. Tablo 2’de farklı zamanlarda ve farklı ülkelerdeki standartlarda, çalışma alanları için tanımlanan aydınlık düzeylerinin değişken olabildiği görülmektedir (Stiller, 2012).

Yapılan bazı deneysel çalışmalarda, kullanıcılara farklı seçenekler test ettirildiğinde, kullanıcıların sadece aydınlatmanın nicelik değerlerine göre hoşnutluk göstermediği, bunun yanında aydınlatmanın niteliğinin, mekandaki ışık dokusunun da hoşnutluğu etkilediği görülmüştür. Farklı seçenekler arasından yapılan seçimlerde, kullanıcıların hoşuna giden ışık kurgusunun, standartlarda tanımlanan sınır değerlerin çok altında veya çok üzerinde olduğu görülebilmektedir.

Yapılan deneysel çalışmalarda, bir deney setinde kurgulanan ve ölçümle belirlenen ışıklılık değerleri ile deneye katılan katılımcıların algıladıkları parlaklık değerlerinin farklı olabildiği görülmüştür. Katılımcılara sunulan senaryolar, katılımcılar tarafından farklı değerlendirilmiş, ve bu durumlar aydınlatma düzenlemelerinin sadece fizyolojik gereksinimlere göre değil, psikolojik konfora olan etkilerine göre de düzenlenmesi gerektiği şekilde açıklanmıştır (Uyan ve ark., 2018). Benzer araştırmalardan da çıkarılan sonuca göre, aydınlatma sistemlerinin uyması gereken standartların yanı sıra, kullanıcıların tercihleri, zevkleri ve sistemden memnuniyetleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2. Ofislerde farklı zaman ve farklı ülke standartlarındaki aydınlık düzeyi değerleri

Ülke ve Yıl	Genel	Bilgisayar	Okuma	Çizim
Avusturya, 1984	500 lx	500 lx	-	750 lx
Brezilya, 1990	750-1,000 lx	-	200-500 lx	3,000 lx
Çin, 1993	100-150-200 lx	-	75-100-150 lx	
Fransa, 1993	425 lx	25-425 lx	425 lx	850 lx
Almanya, 1990	500 lx	500 lx	-	750 lx
Birleşik Krallık,	500 lx	300-500 lx	300 lx	750 lx
ABD, 1993	200-300-500 lx	300 lx	200-300-500 lx	1,000-2,000 lx
Japonya, 1989	300-750 lx	300-750 lx	-	750,1000 lx
Rusya, 1995	300 lx	200 lx	300 lx	500 lx
İsviçre, 1997	500 lx	300-500 lx	500 lx	1,000 lx

Kullanıcı memnuniyetini önemli derecede etkileyen bir başka parametre de aydınlatma sistemlerinin kontrol prensipleridir. Çalışmalar, aydınlatma sistemlerinin otomatik şekilde kontrol edilmesinin, kullanıcı memnuniyetini genelde olumsuz etkileyebilecek bir durum olduğunu göstermektedir. Bu sebeple kullanıcılara, çalıştıkları/buldukları bölümü bireysel olarak kontrol etme imkanı tanıyan bölgesel-işleve yönelik aydınlatma imkanının tanınması var olan memnuniyetsizlikleri gidermede yardımcı olabilmektedir (Kunduracı & Kazanasmaz, 2016). Özetle, standartlara uygun tasarlanmış ve görsel konfor şartlarını sağlamakta olan bir aydınlatma sisteminin yenilenme nedenlerinden biri de, kullanıcı memnuniyetsizliği veya kullanıcının farklı beklentileri olabilmektedir.

3. ENERJİ TÜKETİMİ İLE İLİŞKİLİ YENİLEME GEREKSİNİMLERİ

Aydınlatma alanındaki teknolojinin ilerlemesi ve gereksinimlerin zaman zaman yeniden tanımlanması ile birlikte binalardaki mevcut aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimleri, uygulanabilecek farklı olası çözümlere görece daha yüksek kalabilmektedir. Aydınlatma enerji tüketiminin fazla olması durumu aşağıdaki 3 başlık özelinde incelenebilir;

- Mevcut aydınlatma sisteminin kurulu gücünün minimize edilebilme potansiyelinin bulunması,
- Mevcut sistemin kullanım süresini azaltma potansiyelinin bulunması,
- Mevcut aydınlatma sisteminin, diğer bina sistemlerine olan etkisinin azaltılma potansiyelinin bulunması.

Ayrıca aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimlerinin düzeyi ile ilgili bir diğer gösterge olarak, AB tarafından 2007 yılında yayınlanan EN15193 standardında “Aydınlatma Enerjisi Sayısal Göstergesi” (AESG) ortaya konmuştur (CEN/TR 15193-2:2017, 2017). Burada tanımlanan AESG değeri (orijinal metinde LENI olarak kısaltılmaktadır), birim alandaki (m²) yıllık aydınlatma enerji gereksinimini göstermektedir. AESG değerini etkileyen parametreler arasında toplam kurulu güç, aydınlatma kontrol sistemi ve günışığından yararlanma durumu bulunmaktadır. İlgili standardın devamı niteliğindeki, 2017 yılında yayınlanan “açıklama ve gerekçelendirme” yayınında farklı mekan tipleri için referans kurulu güç ve AESG değerleri tanımlanmıştır.

3.1. Kurulu Güç İle İlgili Gereksinim

Aydınlatma aygıtlarının verimi enerji tüketimi başına ortaya çıkarabildiği (üretebildiği) ışık akısı miktarı ile yani “lumen/watt” ile değerlendirilmektedir. Bir akkor telli lambanın verimi 11-15 lm/W kadardır ve bu verim değeri yaklaşık 100 yıl önce kullanılan akkor lambaların verimi ile aynıdır. Bir yağ lambasının veriminin yaklaşık 1 lm/W olduğu düşünülürse, akkor lambaların keşfinin aydınlatma enerjisi korunumu bakımından önemi anlaşılmaktadır. Ancak bugün aydınlatma teknolojisinin geldiği noktada, akkor lambaların yerine kullanılacak şekilde üretilmiş 50-60 lm/W verime sahip kompakt flüoresan lambalar ile 100-120 lm/W verime sahip LED lambalar bulunmaktadır (Philips, 2022).

ABD’de ilk kez 1975’ de kabul edilen ve tam adı, “Alçak Katlı Konutlar Dışındaki Binalar İçin Enerji Standartı” olan Ashrae 90.1 standardının 2019 yılındaki güncel yayınında “Aydınlatma” başlığında, var olan aydınlatma sistemlerinin bakım ve yenilenmelerinde, aydınlatma elemanlarının %50’sinden fazlasının değiştirilmesi durumunda, yeni sistemin, standartta verilen aydınlatma güç yoğunluğu (Lighting Power Density - LPD) sınırlarında tutulması gerektiği belirtilmektedir. LPD kriteri olarak, farklı bina tipolojilerine göre, birim kullanım alanında (standartın orijinalinde square-foot, ft²) izin verilen kurulu aydınlatma gücü değerleri tanımlanmıştır. Bu standartta verilen sınır değerlerden bazıları örnek olarak Tablo 3’de gösterilmiştir (90.1-2019, 2019). Standartın içerisinde yer alan ve üst sınır kabul edilen değerler, aynı standardın 2016 yılında yayınlanan bir önceki versiyonuna göre %10 ile %20 arası bir düzeyde düşürülmüştür. Gelişen teknoloji ile birlikte, binalarda birim alan başına kurulabilecek aydınlatma enerji yükleri üst limitleri aşağı çekilmiştir. Zaman içinde binalarda aydınlatma enerji korunumu potansiyelinin arttığı görülmektedir.

Tablo 3. Ashrae 90.1-2019 Standardında verilen “Aydınlatma Güç Yoğunluğu” sınır değerleri ve aynı değerlerin 2016 yılı yayınındaki durumu.

Bina Tipolojisi	2016 standardı W/m ²	2019 standardı W/m ²	Bina Tipolojisi	2016 standardı W/m ²	2019 standardı W/m ²
Kongre merkezi	8,18	6,88	Hastane	11,30	10,33
Yeme-içme	9,68	8,61	Ofis	8,50	6,88
Öğrenci yurdu	6,56	5,70	Okul / Üniversite	8,71	7,75
Spor salonu	7,31	8,18	Üretim tesisleri	9,68	8,82

CEN/TR 15193-2:2017 numaralı AB standardında da bazı mekan tipleri için kurulu güç referans değerleri tanımlanmıştır. Standart için 2021 yılında bir iyileştirme yayınlanmıştır ancak bu iyileştirmede LENI değerleri güncellenmemiştir. Standart içerisinde yer verilen bazı mekan tipleri için kurulu güç ve LENI referans değerleri Tablo 4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. Bazı mekan tipleri için kurulu güç ve LENI referans değerleri
(CEN/TR 15193-2:2017)

Mekan Tipi	Aydınlatma sisteminin durumu	Kurulu Güç W/m ²	AESG (LENI) kWsaat/m ² .yıl
Sirkülasyon alanı	Standart	7,74	6,81
Kişisel Ofis (Tek kullanıcı)	Enerji etkin	12,18	10,97
Konferans	Enerji etkin	12,37	15,30
Açık Ofis	Enerji etkin	10,73	23,23
Mutfak (Konut dışı)	Enerji etkin	11,54	23,60
Çatı ışıklığı olan üretim alanı	T16 Flüoresan	12,76	2,01
Çatı ışıklığı olmayan üretim alanı	T16 Flüoresan	12,76	41,57

3.2. Aydınlatma Kontrol Sistemleri İle İlgili Gereksinim

Enerji tüketiminin fazla olması, yüksek enerji tüketen ışık kaynakları sebebiyle olabildiği gibi, bir diğer sebep de sistemin doğru kontrol edilmemesi olabilmektedir. Günümüzde aydınlatma kontrol sistemlerinin, aydınlatma enerji tüketimini düşürdüğü yapılan birçok araştırma ve uygulama ile çokça ortaya konmuştur. Binalarda aydınlatma kontrolleri genel olarak 4 tip yöntemle ayrılarak incelenebilir;

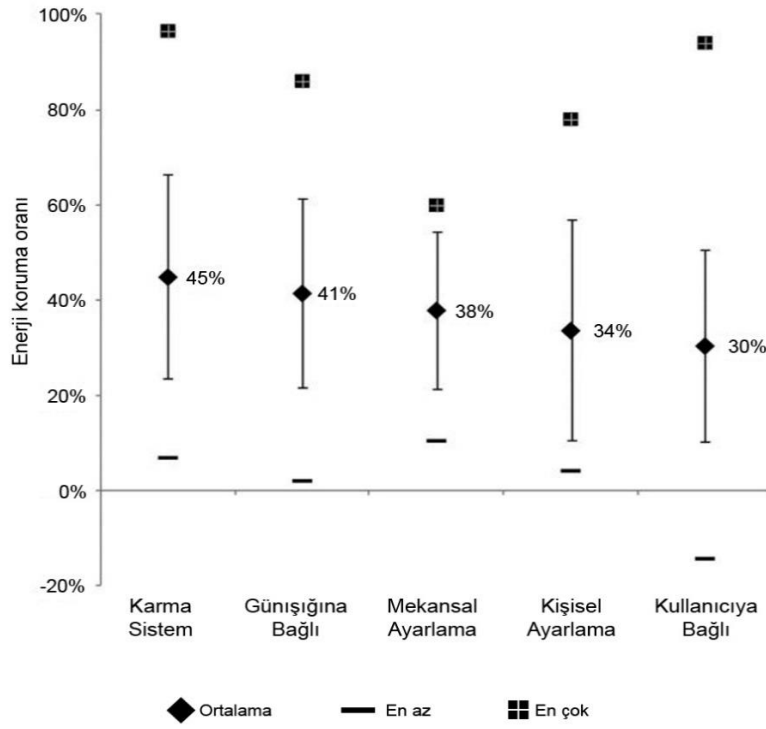
Kullanıcı duyarlı aydınlatma kontrolleri, aydınlık düzeyini mekanda kullanıcı bulunup bulunmamasına göre ayarlar. Bu yöntem için, kullanıcı sensörleri, zaman saatleri, enerji yönetim sistemleri kullanılır.

Günüşiği duyarlı aydınlatma kontrolleri, doğal ışığın varlığına göre mekandaki aydınlık düzeyini otomatik olarak ayarlar ve bu tip kontrol için fotosensörler ve zaman saatleri kullanılır.

Kişisel ayarlama tipi aydınlatma kontrolleri, kullanıcıların kendi kişisel tercihlerine göre aydınlatmayı ayarlamalarına olanak verirler ve loşlaştırma ekipmanları, kablosuz aç-kapa anahtarlar, bilgisayar tabanlı kontroller ve önceden ayarlanmış senaryo seçimleri bu kontrol tipinde yer alır.

Mekansal ayarlama tipi aydınlatma kontrolleri, binalarda mekan bazında ihtiyaçları karşılamak üzere aydınlık düzeyi ayarlamalarının yapıldığı aydınlatma kontrol tipidir.

Ticari binalarda aydınlatma kontrolleri üzerine yapılmış bir çalışmada 88 araştırma yazısında incelenen 240 adet iyileştirme tahmini derlenmiş ve aydınlatma kontrollerinin kullanılmasının aydınlatma enerji tüketimine katkıları Şekil 1'deki grafikte özetlenmiştir. Çıkan sonuçlara göre, mevcut bir aydınlatma sistemine eklenecek bir aydınlatma kontrol sistemi, enerji tüketimini ortalama %30 ile %45 oranları arasında azaltabilme potansiyeline sahiptir (Williams ve ark., 2012). Bu durumda kontrol edilmeyen bir aydınlatma sistemine kazandırılacak bu tasarruf olanağı, mevcut sistemi yenilemek için bir neden olarak ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 1. Farklı aydınlatma kontrol tiplerinin, mevcut aydınlatma sistemlerine uygulanmaları halinde enerji tüketimlerini azaltma oranları (Williams ve ark., 2012).

3.3. Aydınlatma Sistemlerinin Diğer Bina Sistemlerine Etkisi İle İlgili Gereksinim

Tüm elektrikli ışık kaynakları elektrik enerjisini değişen oranlarda ısı ve ışınımaya çevirirler. Akkor telli lambalar daha çok oranda kızılötesi ışınım ve çok düşük oranda görülebilir ışın yayırlar. LED'ler kızılötesi ve morötesi ışınım yaymaz ve üretilen görülebilir ışığın yanında, kalan enerji ısıya dönüştürülür. Bu ısı, ışık kaynağından sistemin diğer ünitelerine taşınarak hava yolu ile ortama yayılır (Kitsinelis & Kitsinelis, 2015). Elektrikli lambaların çalışma prensipleri nedeniyle ortaya çıkan bu ısı enerjileri ortam sıcaklığına etki eder, böylece sıcak havalarda soğutma yüklerine, soğuk havalarda da ısıtma yüklerine etki ederler.

Literatürde bulunan çeşitli araştırmalar, ışık kaynaklarının ürettiği fazla ısının yapılardaki soğutma yüklerine yaptığı olumsuz etkiyi ortaya koymaktadır. Çin'de farklı iklim bölgelerindeki binalar üzerinde yapılan araştırma ile bu etkiler ortaya konmuştur. Ortaya çıkan sonuçlara göre, bir mekandaki elektrikli aydınlatma ürünlerinden yayılan ısının, sıcak günlerde soğutma yüklerine etkisi, soğuk günlerde ısıtma yüklerine etkisinin birkaç kat fazlası olabilmektedir (Lam ve ark., 2006). Soğuk iklime sahip İsveç Göteborg şehrinde yapılan bir araştırmada, ortama daha fazla ısı yayan enkandesan lambaların daha az enerji tüketen ve ortama daha az ısı yayan LED lambalar ile değişimi sonunda %35-80 arasında enerjinin korunduğu gözlenmiştir (Norden ve ark., 2015).

4. ÇEVRESEL KONULAR İLE İLİŞKİLİ YENİLEME GEREKSİNİMLERİ

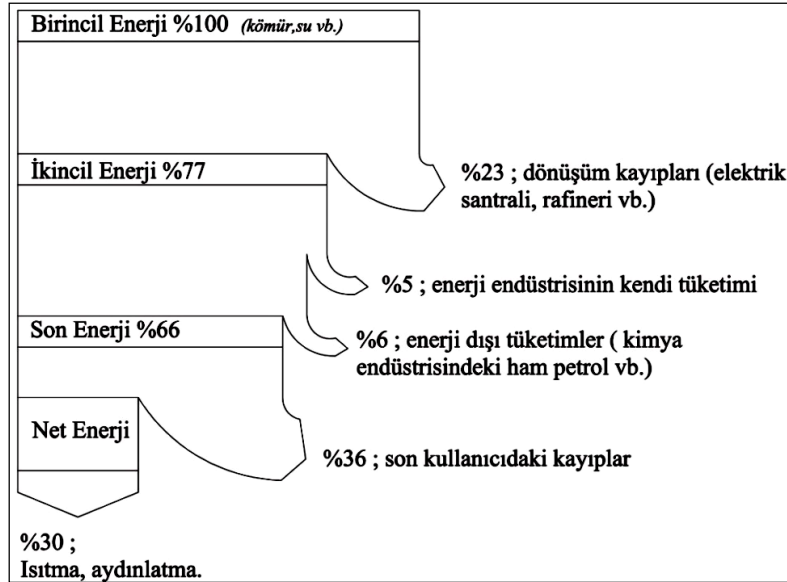
Aydınlatma sistemleri gerek tükettikleri enerjiye gerekse sistemi oluşturan elemanların bileşenlerine bağlı olarak çevreye etki etmektedirler. Kullanım sürecinde tüketilen enerjiye karşılık gelen sera gazı salımları çevre etkisi değerlendirmesinde en büyük etkiyi oluşturan özellik olarak öne çıkmaktadır. Bunun yanında çevresel konulara dair, aydınlatma sistemi elemanlarının üretim süreçlerindeki çevreye etkileri ve kullanım süreleri sonunda ortaya çıkardıkları atıkların geri dönüşüm ve çevreye zararları ile ilgili konular incelenmektedir.

4.1. Sera Gazı Salımı

Binalar, dünyadaki toplam sera gazı salımının %30'luk kısmından sorumludur (Maldonado ve ark., 2018). Sera etkisi oluşturan gazların normalden fazla salımları, yer yüzeyine ulaşır geri yansıyan ışınımın tutulmasına neden olarak "küresel ısınma" olarak da adlandırılan iklimsel değişikliğe yol açar. İklimsel değişikliğe neden olan başlıca altı sera gazı; KarbonDiOksit (CO₂), Metan (CH₄), Azotoksit (N₂O), Hidroflorokarbon (HFC), Perflorokarbon (PFC) ve KükürtHekzaFlorid (SF₆) olarak sıralanmaktadır. Bunların içinde %80'lik payı ile en önemlisi CO₂ gazıdır (Karakaya & Özçağ, 2003).

Bina aydınlatma sistemlerinin enerji tüketimlerinin, sera gazı salımına doğrudan etki ettiği düşünülmektedir. 1 kWh elektrik tüketimi için yaklaşık 527 g CO₂ gazı çevreye salınmaktadır. Binalarda aydınlatma sistemlerinde tüketilen son ürün olan elektrik enerjisinin, kömür vb. ilk ham madde üründen son kullanıcının hizmetine sunulduğu aşamaya kadar geçen dönüşüm sürecinde Şekil 2'de görüldüğü gibi yaklaşık %70'lik önemli bir kayba uğramaktadır (Hegger ve ark., 2008). Bu kayıplar göz önünde bulundurulduğunda, son kullanıcı tarafından kullanılan bina aydınlatma enerjisinin minimize edilmesi daha da fazla önem kazanmaktadır.

Aydınlatma sistemlerinin CO₂ salımının azaltılması, bu sistemlerinin daha az enerji tüketen şekilde yenilenmeleri veya baştan bu hassasiyetle tasarlanmaları ile mümkündür. Yapılan çalışmalar, eski tip ışık kaynağı kullanan aydınlatma sistemlerinin sera gazı salımının, bu sistemlerin güncel LED ışık kaynağı kullanacak şekilde yenilenmesi ile %41 düzeyinde düşürülebileceğini göstermektedir (Sedziwy ve ark., 2018). Tüm sistemin enerji tüketiminin yanında, aydınlatma sistemlerinin sera gazı salımını minimize etmeyi sağlayan başka etkenler de bulunmaktadır. Bu etkenlere örnek olarak; sistemi oluşturan her bir elemanın enerji etkin olması, bu elemanların yaşam ömürlerinin uzun olması, üretim ve hammaddelerin yerel olması, ulaştırma süreçlerinin mümkün olduğunca az olması, geri dönüşümlü ürünlerin ve geri dönüşümlü paketlemeye sahip malzemelerin seçilmesi gösterilebilir.



Şekil 2. Bir kaynağın, binalarda kullanılan elektrik enerjisine dönüşme sürecindeki kayıplar (Hegger ve ark., 2008).

4.2. Geri Dönüşüm ve Atık

Aydınlatma sistemlerinin çevreye etkileri, enerji tüketimleri sebebiyle olmasının yanında bir de içerdikleri malzemelerin kullanım ömürleri sonunda geri dönüşümleri ile ilgidir. Tablo 5’de birbirleri yerine tercih edilebilecek geleneksel ışık kaynaklarının içeriklerinde barındırdıkları malzemeler gösterilmiştir. Enkandesan lambaların içerisinde elektronik bir aksam bulunmamakta ve bu tür lambaların geri dönüşümleri basit katı atık dönüşüm merkezlerinde gerçekleştirilmektedir. Halojen lambalar ise, voltaj dönüşümü için bir transformatör gerektirmekte olup, geri dönüşümü için AB direktiflerinde tanımlanan bir dönüşüme gereksinim duymaktadır. Flüoresan lambalar da ışık yayılımı için bir balasta gereksinim duymaktadırlar ve hem bu elektronik ekipman hem de bünyesinde barındırdığı cıvadan ötürü geri dönüşümleri belirli yönetmeliklere uygun olarak gerçekleşmek zorundadır. Kompakt floresan lambalar çalışmak için harici bir ekipmana gereksinim duymasa da içerisindeki 15,26 gramlık elektronik dahili balastı ve cıva miktarı nedeniyle yine bu lambalar da yönetmeliklere uygun bir geri dönüşüme tabidirler (Welz ve ark., 2011).

Yapıların kendisinin ve tüm alt sistemlerinin tasarım - yapım - kullanım - geri dönüşüm süreçleri yaşam döngüsü düşüncesi ile gerçekleştirilmelidir. Malzemelerin kullanılabilirliğinden bir şey kaybetmeksizin faydalı bir formdan bir başka faydalı forma dönüşmesi üzerine kurulu olan yaşam döngüsü, binalarda, “bina-öncesi”, “bina” ve “bina-sonrası” evreler olarak kategorize edilir (Özçuhadar, 2007). Bu durumda “bina” evresinin olabildiğince uzun süreli olması, bu döngüyü uzatacaktır. Aydınlatma sistemlerinin de kullanım süreleri, aynı amaç doğrultusunda olabildiğince uzun olmalı ve böylece, oluşacak atıkların miktarını ve geri dönüşüm yapılması gereken malzemeleri azaltmalıdır. Bu durum aynı zamanda yeni kullanılacak ekipman miktarını da düşürecektir. Yeni tasarlanacak aydınlatma sistemlerinde bu konuya dikkat edilerek ekipman seçimi yapılması gerektiği gibi, mevcut aydınlatma sistemleri için de iyileştirme potansiyelleri düşünülerek, daha uzun ömürlü ekipmanlar kolayca mevcut sisteme entegre edilebilmektedir.

Tablo 5. Benzer kullanım amacı taşıyan farklı lamba tiplerinin çevresel etkileri (Welz ve ark., 2011).

Lamba türü	Akkor telli	Halojen	Floresan	Kompakt floresan
Güç (Watt)	60W	35W	14W	11W
Net Ağırlık (g)	33,02	29,15	226,25	111,28
Yaşam ömrü (saat)	1000	2000	20,000	10,000
Cam (g)	30	2	46	65
Metal (g)	3	4,63	95,56	4
Elektronik (g)	-	12,92	69,13	15,26
Plastic (g)	-	9,94	13,97	25
Gaz (g)	0,01	0,02	0,80	1
Cıva (g)	-	-	3	4

5. YAŞAM ÖMRÜ VE TEKNOLOJİ İLE İLGİLİ YENİLEME GEREKSİNİMLERİ

Mevcut aydınlatma sistemlerinin yakın gelecekte yaşam ömürlerini dolduracak olmaları, veya sistemin bileşenlerinin yakın gelecekte artık tedarik edilemeyecek olması da bu sistemlerin yenilenmelerini gerektiren nedenler olabilmektedir.

5.1. Yaşam Ömrü Ve Teknoloji İle İlgili Gereksinim

Yapma ışık kaynaklarının tarihsel gelişimi incelendiğinde, her dönem için değişmeyen iki arayış görülmektedir; ışık kaynaklarının enerjiyi daha verimli tüketmeleri ve yine bu ışık kaynaklarının yaşam ömürlerinin daha uzun olabilmesi. Teknolojik ilerlemeler ile birlikte her seferinde daha fazla ışık üretebilen veya aynı miktardaki ışığı daha az enerji ile üreten ama en önemlisi de daha uzun süre dayanan lambalar için araştırmalar yapıldığı anlaşılmaktadır. İlk zamanlarda mekanları aydınlatan fenerler, daha sonra yerlerini yağ lambalarına, sonrasında gaz lambalarına, sonrasında elektrikli lambalara ve günümüzde artık elektronik yöntemle ışık üreten LED lambalara bırakmıştır.

Teknolojik ilerleme ve değişimler, aydınlatma piyasasında da bazı yenilikleri beraberinde getirmekte ve mevcut durumda satın alınabilecek aydınlatma ürünleri veya yedek parça bileşenleri değişebilmektedir. Örneğin 1968 yılında yazılmış bir kitapta yer alan akkor telli tip lambalar, yakın geçmişe kadar firma kataloglarında hiç değişmeden var olabilmelerine rağmen, son 5 yıllık süreçte neredeyse kataloglardan tamamen silinmiştir. Tablo 6’da bu değişimi görülmektedir.

Teknolojinin getirdiği bu değişim, mevcut aydınlatma sistemlerinin belli dönemlerde, henüz yaşam ömürleri bitmiş olmasa bile, yenilenmeleri gerekliliğini doğurabilmektedir.

Tablo 6. Akkor telli lambaların geçmiş ve bugünkü durumları.
(Özkaya, 1968; Philips, 2008; Philips, 2017; Philips, 2022).

Lamba Tipi	1968 Kaynağında	2008 Kataloğu	2017 Kataloğu	2022 Kataloğu
15 Watt Akkor Telli	Var (120 lumen)	Var (115 lumen)	-	-
25 Watt Akkor Telli	Var (230 lumen)	Var (240 lumen)	Var (220 lumen)	-
40 Watt Akkor Telli	Var (420 lumen)	Var (410 lumen)	Var (415 lumen)	Var (415 lumen)
60 Watt Akkor Telli	Var (720 lumen)	Var (700 lumen)	Var (730 lumen)	-
75 Watt Akkor Telli	Var (930 lumen)	-	Var (930 lumen)	-
100 Watt Akkor Telli	Var (1350 lumen)	Var (1330 lumen)	Var (1340 lumen)	-
150 Watt Akkor Telli	Var (2000 lumen)	Var (2140 lumen)	-	-
200 Watt Akkor Telli	Var (2800 lumen)	-	-	-
300 Watt Akkor Telli	Var (4650 lumen)	-	-	-
500 Watt Akkor Telli	Var (8200 lumen)	-	-	-
1000 Watt Akkor Telli	Var (18000 lumen)	-	-	-
1500 Watt Akkor Telli	Var (30000 lumen)	-	-	-

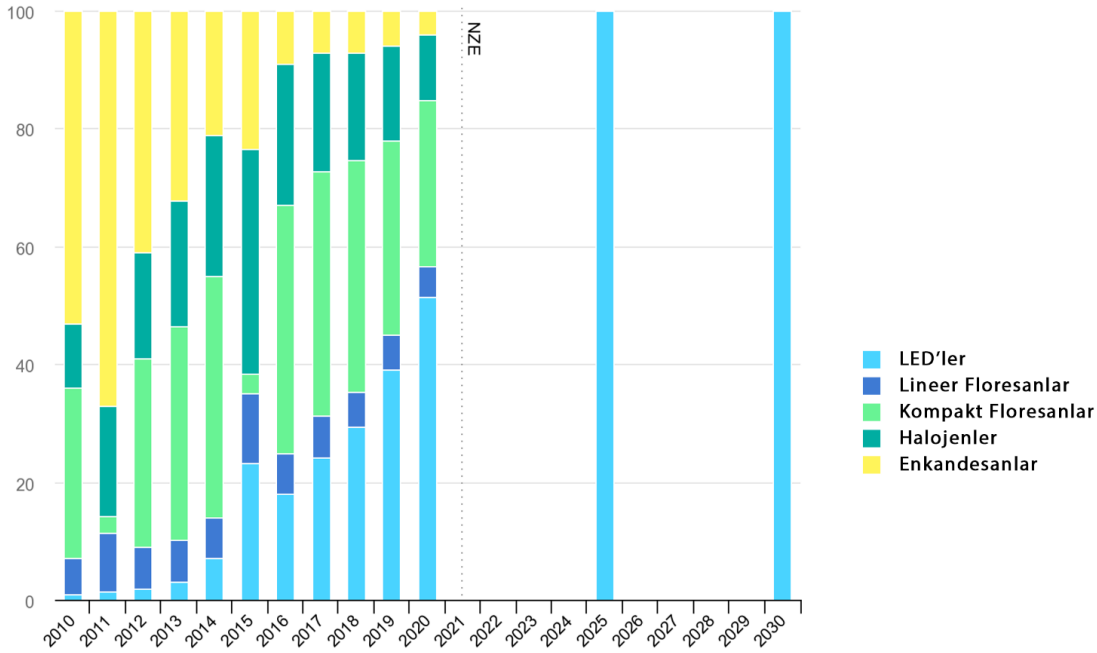
Yapılan araştırmalarda, binaların belirli yaşam süreçlerinin olduğunu ve elektrik sistemlerinin genellikle binalarda 17-29. Yıllar arasında yenilendiğini göstermektedir (Albrice, 2015). Almanya’da yayımlanan, “Bina uygulamalarının ekonomik etkinliği” adlı VDI 2067 standardında da bina aydınlatma sistemlerinin yaşam ömürleri toplam 20 yıl olarak ele alınmaktadır (Lohse ve ark., 2016). Bu durumda bir yapının ömrü devam ederken, o yapının mevcut aydınlatma sisteminin yaşam ömrünün biteceği, ve bu nedenle aydınlatma sisteminin bir veya daha fazla kez yenilenmesi gerekeceği ortaya çıkmaktadır.

5.2. Yakın Gelecek Beklentileri ve Direktifler

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) istatistiklerine göre, dünya genelinde satın alınan ışık kaynakları arasında enkandesan lambaların payı 2010 yılından 2021 yılına kadar oldukça gerilemiş ve bu payı büyük ölçüde LED ışık kaynakları devralmıştır. Ancak diğer geleneksel tip ışık kaynakları bu süreçteki piyasa payını neredeyse aynı ölçüde korumuşlardır. IEA'nın yakın gelecek öngörüsüne göre 2025 ve 2030 yılına gelindiğinde satılan tüm ışık kaynakları Şekil 3'de de görüldüğü gibi LED teknolojili olacaktır (IEA, 2021).

Aydınlatma sistemlerinin yenilenmelerini zorunlu kılacak bir diğer önemli durum da, artık bazı geleneksel tip lambaların satışlarının durdurulması ile ilgili çabaların ve buna bağlı olarak yasal düzenlemelerin yapıyor olmasıdır. Bu konuda güncel en önemli örnek, AB tarafından yayınlanan "Elektrikli ve Elektronik Ekipmanlarda Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması" isimli yasal düzenlemedir (Avrupa Komisyonu, 2011). Bu düzenleme ile, özellikle bünyesinde civa olması nedeniyle, tüm floresan, alçak basınçlı ve yüksek basınçlı deşarj lambaların AB sınırları içerisindeki satışı 2023 - 2027 yılları arasında kademeli şekilde yasaklanmaktadır. Böylece çok yakın bir gelecekte satışı yasaklanacak bu lambaları kullanan sistemlerin, ekipman veya sistem bazında yenilenme gereksinimleri kaçınılmaz olacaktır.

Yakın geçmişte yaşanan Covid-19 pandemisi ile birlikte firmaların evden çalışma oranları büyük oranda artmıştır. Amerika'da daha önce %5 olan evden çalışma oranı pandemi ile birlikte 2020 yılında %50 düzeyine yükselirken, İngiltere'de %4,7 olan oran %43 düzeyine çıkmıştır (Martin ve ark., 2022). Çalışma hayatı ve ev hayatındaki bu denli büyük bir değişim, evlerdeki mevcut iç mekan kurgularında ve hatta yaşam alışkanlıklarında değişiklik yapmayı zorunlu kılacaktır. Yeni ortaya çıkan durumda, bu yeni çalışma ortamlarının daha ideal şartlar kazanması için mevcut şartların iyileştirilmesi için mevcut aydınlatma sistemlerinin yenilenmesi konusu gündeme gelebilecektir. Örneğin daha önceleri sadece akşamları kısa süreliğine kullanılan odalar, artık gün boyu çalışma amacıyla kullanılabilen ve bu odalarda verimli bir günışığı ve görsel konfor şartlarını sağlayan bir aydınlatma düzeni gereksinimi ortaya çıkabilmektedir.



Şekil 3: Dünya genelinde satılan lamba/ışık kaynağı tiplerine dair IEA'nın gelecek öngörüsü (IEA, 2021).

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışma, binalardaki mevcut aydınlatma sistemlerinin yenilenme gereksinimlerinin hangi başlıklarda değerlendirilebileceğine odaklanmıştır. Çalışma içerisinde de belirtildiği gibi, bir mevcut sistem bir çok farklı sebepten ötürü yenilenmeye gereksinim duyabilmektedir. Bu sebepler, kullanıcı konforunu sağlamakla ilgili olabildiği gibi, enerji tüketimini azaltmak, çevresel etkiyi düşürmek veya artık piyasada bulunamayan ekipmanları, yenileri ile değiştirmekle ilgili de olabilirler. Ayrıca güncel küresel politikalar ve hedefler de kullanıcıları bu değişimlere zorunlu bırakabilmektedir.

Öte yandan, her aydınlatma sistemi yenileme veya değiştirme eyleminin, bir atık ürettiği de unutulmamalıdır. Bu süreçler çalışılırken, 2015 yılında yayımlanan “Atık Yönetimi Yönetmeliği” ile uyumlu olacak şekilde atık ve geri dönüşüm stratejileri de geliştirilmelidir.

Sonuç olarak kaçınılmaz olan değişim veya yenilemelerin, içinde bulunulan dönemin teknolojisinden yararlanan ama farklı dönemlerde de kullanılabilir, ilkeleri tanımlı bir süreç ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ve benzeri çalışmalar, mevcut aydınlatma sistemlerinin önce yenilenme gereksinimi belirlemede, sonrasında da değişim/yenileme sürecindeki ilkeleri belirlemede faydalı olacaktır. Bu türden çalışmalar, literatüre katkı sunmanın yanında, yapı sektörü için de bir tür uygulama rehberi şeklinde kullanılabilirlerdir.

Aydınlatma sistemlerinin yenilenmesine ilişkin karar alınması sürecinde çalışmada ele alınan başlıklar altında gerekli değerlendirmelerin yapılmasının akılcı ve sürdürülebilir uygulamalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Albrice, D. (2015). How Long Do Buildings Last. <https://thecondogroup.com/long-buildings-last-david-albrice/> adresinden 06 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.

Avrupa Komisyonu (2011). Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS). https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en adresinden 06 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.

CEN/TR 15193-2:2017 (2017). Binalardaki enerji performansı – Aydınlatma ile ilgili enerji gerekleri – Bölüm 2: EN 15193-1 Modül M9, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

- Global Alliance for Buildings and Construction (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf adresinden 06 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Halonen, L., Tetri, E. & Bhusal, P. (edt.) (2010). Annex 45 Guidebook On Energy Efficient Electric Lighting For Buildings. *Aalto Üniversitesi, Aalto*.
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2008). Energy Manual: Sustainable Architecture. *Birkhauser Verlag AG, Basel*.
- IEA (2021). Global lighting sales, historical and in the Net-Zero Scenario, 2010-2030, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-lighting-sales-historical-and-in-the-net-zero-scenario-2010-2030> adresinden 6 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- İncedayı, D. (2007). Sürdürülebilirliğin kültürel boyutu, dosya 05 -sürdürülebilirlik: Kent ve mimarlık, *Mimarlar Odası Ankara Şubesi Bülteni*, no:51.
- İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu (1995). Enerji Etkin Konut ve Yerleşme Tasarımı, Proje No: İNTAG 201. *TUBİTAK, Ankara*.
- Karakaya, E. & Özçağ M. (2003). *Türkiye Açısından Kyoto Protokolü'nün Değerlendirilmesi Ve Ayrıştırma (Decomposition) Yöntemi ile CO2 Emisyonu Belirleyicilerinin Analizi*, VII. ODTÜ Ekonomi Konferansı, Ankara.
- Kitsinelis, S. & Kitsinelis S. (2015). Light Sources: Basics of Lighting Technologies and Applications, *Routledge, United Kingdom*.
- Kunduracı, A.C., Kazanasmaz, T. (2016). Aydınlatma kontrol sistemlerinin kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkisine eleştirel bir bakış, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(3), 553-560.
- Lam, J. C., Tsang, C.L. & Yang, L. (2006). Impacts of lighting density on heating and cooling loads in different climates in China, *Energy Conversion and Management*, 47(13-14), 1942-1953.
- Lohse, R., Staller, H. & Riel M. (2016). The economic challenges of deep energy renovation - differences, similarities, and possible solutions in central europe: Austria and Germany. *ASHRAE Transactions*, 122(1), 69-87.
- Maldonado, L., Hidalgo, A. & Hechavarria R. (2018). Greenhouse gas emission reduction by the selection of efficient lighting systems, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 188.
- Martin, L., Hauret, L. & Fuhrer, C. (2022). Digitally transformed home office impacts on job satisfaction, job stress and job productivity. COVID-19 findings. *PLOS ONE* 17(3), e0265131.
- Norden, J., Karlsson, H., Markusson, C., Ruud S., Lindgren, M. & Ollas, P. (2015). *Changing to energy efficient light sources - an analysis of the energy balance of buildings*, 6th International Building Physics Conference, Italy.

- Özçuhadar, T. (2007). *Sürdürülebilir çevre için enerji etkin tasarımın yaşam döngüsü sürecinde incelenmesi* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özkaya, M. (1968). Aydınlatma tekniği, *İtü Teknik Okulu Yayınları*, İstanbul.
- Philips (2017). Fiyat listesi mayıs [Katalog]. *Philips Aydınlatma*, Hollanda.
- Philips (2008). Lighting catalog lamp specification and application guide 2008–2009 [Katalog]. *Philips*, Hollanda.
- Philips (2022). Ürün Kataloğu. <https://www.lighting.philips.com.tr/prof> adresinden 6 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Sedziwy, A., Basiura, A. & Wojnicki, I. (2018). Roadway lighting retrofit: Environmental and economic impact of greenhouse gases footprint reduction, *Sustainability*, 10(11), 3925.
- Sirel, Ş. (2012). Aydınlatma sözlüğü, *Yapı Fiziği Enstitüsü*, İstanbul.
- Stiller, M. (2012). Quality lighting for high performance buildings, *The Fairmont Press Inc.* ABD.
- TS EN 12464-1:2021 (2021). Işık ve aydınlatma - Çalışma yerlerinin aydınlatılması - Bölüm 1: Kapalı çalışma alanları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12665 (2019). Işık ve aydınlatma-Aydınlatma kurallarını belirleyen temel tarifler ve kriterler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Uyan, E., Küçükdoğu, M.Ş. & Aydemir, I. (2018). Aydınlatma Kalitesini Belirleyen Psikolojik Parametrelerin Çalışma Alanı Örneğinde İncelenmesi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(33), 51-60.
- Welz, T., Hischer, R. & Hilty L.M. (2011). Environmental Impacts of Lighting Technologies - Life Cycle Assessment And Sensitivity Analysis, *Environ Impact Asses Rev.*, 31(3), 334-343.
- Williams, A., Atkinson, B., Garbesi, K., Page, E. & Rubinstein, F. (2012). Lighting controls in commercial buildings, *The Journal of the Illuminating Engineering Society*, 8(3), 161-180.
- 90.1-2019 (2019). Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, *ANSI/ASHRAE/IES*, ABD.



Araştırma Makalesi / Research Article

TOPLU ULAŞIMDA YENİLİKÇİ GARAJ İŞLETTİRME MODELİ İÇİN ELEKTRİKLİ OTOBÜS KONSEPTİ

ELECTRIC BUS CONCEPT ON INNOVATIVE GARAGE OPERATING BY OUTSOURCE MODEL FOR PUBLIC TRANSPORT

Orhan TOPAL¹

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1132070>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
otopal@aselsan.com.tr

Geliş Tarihi / Received
16.06.2022

Kabul Tarihi / Accepted
08.12.2022

Öz

Sürdürülebilir ulaşım konseptlerinin ön plana çıktığı günümüzde, kullanılan enerji kaynakları için etkin yönetim ve muhtemel tasarruf potansiyellerine dair birçok yaklaşım sunulmaktadır. Uluslararası Enerji Ajansı tarafından yayınlanan güncel verilere göre dünya genelinde birincil enerji kaynaklarının yaklaşık %25 ulaşım sektörü tarafından tüketilmektedir. Ayrıca bu sektörde kullanılan akaryakıt miktarlarına bağlı olarak meydana gelen sera gazı salınımı bir önceki yıla göre %7,01 oranında arttığı belirtilmektedir. Bu durum yerel yönetimlerin önemli faaliyet alanlarından olan toplu ulaşım hizmetlerinde; % 100 sıfır emisyon konseptine esas, verimliliği arttıracak farklı yaklaşımların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada, İstanbul'da sunulan lastik tekerlekli toplu ulaşım hizmeti kapsamında mevcut sistemde henüz yer almayan, elektrikli otobüs konseptine dair, yenilikçi bir yaklaşım sunulmuştur. İstanbul, İETT özelinde araç alım ve garaj işletme modellerini esas alan hibrit bir yaklaşımla, konvansiyonel motorlu otobüsler yerine elektrikli otobüslerin kullanımına imkân sağlayacak, referans alınan reel maliyetler doğrultusunda bir model ortaya konulmuştur. Öngörülen hibrit modele esas 1,45 Euro/km birim maliyet ile elektrikli otobüslerle anahtar teslim toplu ulaşım hizmeti sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Bu sonuç İstanbul lastik tekerlekli toplu ulaşım sisteminin etkin, verimli, sürdürülebilir bir yaklaşım fırsatı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli otobüsler, elektrikli otobüslü garaj işletme modeli, lastik tekerlekli toplu ulaşım.

Abstract

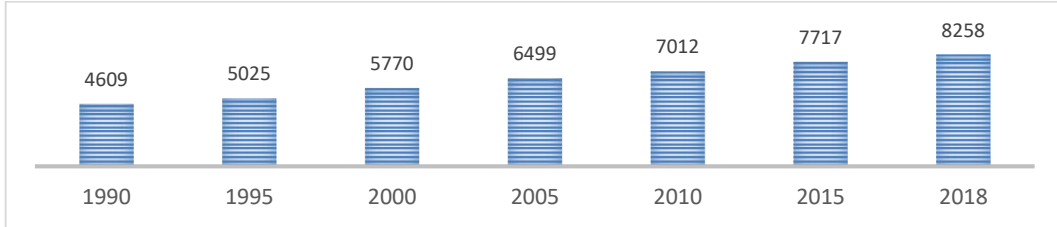
In today's conditions, where sustainable transportation concepts come to the fore, many approaches are presented regarding effective management and possible savings potential for energy resources. According to the current data published by the International Energy Agency, approximately %25 of primary energy resources are consumed by the transportation sector worldwide. In addition, it is stated that greenhouse gas emissions due to the amount of fuel used in this sector increased by %7,01 compared to the previous year. This situation necessitates the development of different approaches that will increase the efficiency based on the %100 zero emission concept in public transportation services, which is one of the important fields of activity of local governments. In this study, an innovative approach to the electric bus concept, which is not yet included in the current system, is included within the scope of the rubber-tyred public transportation service offered in Istanbul. With a hybrid approach based on vehicle purchase and garage operation by outsource models specific to Istanbul, İETT, it is possible to use electric buses instead of buses with internal combustion engines. It has been revealed that turnkey public transportation service can be provided with electric buses with a unit cost of 1.45 Euro/km based on the model predicted in line with the reference costs. This result offers the opportunity for an effective, efficient and sustainable approach to the Istanbul rubber-tyred public transportation system.

Keywords: Electric buses, garage operating by outsource model with electric bus, sustainable rubber-tyred public transport.

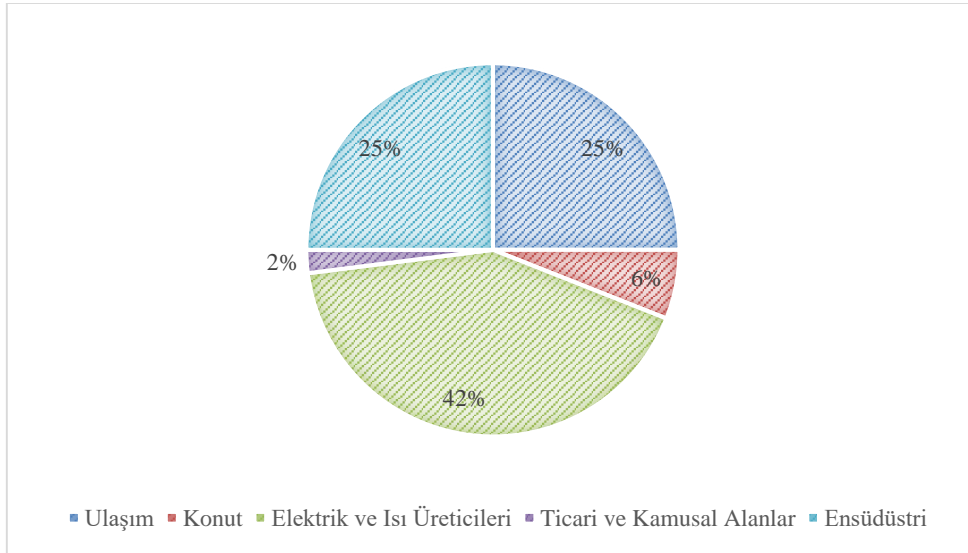
¹Aselsan A.Ş., Ulaşım, Güvenlik, Enerji ve Otomasyon Sistemleri Sektör Başkanlığı (UGES), Ankara, Türkiye.
otopal@aselsan.com.tr, Orcid.org/0000-0003-3857-5689.

1. GİRİŞ

Dünya genelinde ulaşım kaynaklı emisyon salınımları her geçen yıl artarken bu konuya yönelik farklı alanlarda yenilikçi yaklaşımlar sunulmaktadır. Şekil 1 'de Uluslararası Enerji Ajansı güncel verilerine göre sera gazı emisyon değerlerinin %25'nin ulaşım kaynaklı olduğu ve bu değerın 8.258 Mt CO₂ değerine karşılık geldiği bildirilmiştir (IEA 2, 2021). Yürürlüğe alınan delegasyonlar ve anlaşmalar çerçevesinde birçok toplu ulaşım işletmecisi, faaliyet alanlarında bu konuya dair çalışmalar yürütmektedir (Zimmermann ve ark. ,2010).



Şekil 1. Dünyada Ulaşım Kaynaklı Sera Gazı Salınımı (Mt CO₂_2018) (IEA,2021)



Şekil 2. Kaynaklarına göre CO₂ Emisyonlarının Dağılımı (IEA,2021)

İstanbul Elektrik Tramvay ve Tünel İşletmeleri (İETT), İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı toplu taşıma hizmeti veren kuruluş olup, sahip olduğu 150 yıllık birikimle dünyanın ve Türkiye'nin önde gelen toplu ulaşım otorite ve işletmecisi olarak ön plana çıkmaktadır. İETT, uzun yıllar geleneksel araç alım ve garaj işletmeciliği çerçevesinde faaliyetlerini yürütmektedir.

İstanbul'da bütün dünyayı etkisi altına alan pandemi öncesi, 2019 yılı verilerini esas alan ortalama günlük yolculuk sayısı 31 milyonu seviyesinin üzerindedir. Buna göre günlük yolculuk sayısının yaklaşık %45'ini yaya yolculuklarından meydana gelmektedir. Bu yolculukların %28'ini toplu ulaşım ile %20'sini özel araçlarla ve son olarak %7'sini de servislerle gerçekleştirilmektedir (İstanbul Yıllık Ulaşım Raporu, 2017). Toplu ulaşım ile yapılan yolculuklarının kendi içinde dağılımına bakıldığında ise karayolu taşımacılığı % 77,1'lik payla ilk sırada yer almaktadır. Bu kategoride İETT toplamda 3.607 adet otobüs ve 2.059.151 yolculukla % 13,4 paya, Özel Halk Otobüsleri 2.154 adet otobüs ve 1.607.036 yolculukla %10,6'lık paya ve İstanbul Otobüs A.Ş ise 985 adet otobüs ve 860.801 yolculukla %5,7'lik paya sahiptir. Son olarak servis, taksi ve dolmuşlarla yapılan yolculuklar ise %40,4 'lük orana karşılık gelmektedir (İETT, 2021).

Dünya genelinde toplu ulaşım sistemlerinde elektrikli otobüslere doğru genel bir eksen kayması söz konusudur. Buna karşın Türkiye’de 2020 yılında yerel yönetimler tarafından gerçekleştirilen ihalelerle toplamda 695 adet (173 adet CNG’li ve 522 adet dizel) içten yanmalı konvansiyonel motorlu şehir içi otobüs alımı gerçekleştirilmesine rağmen hiç elektrikli otobüs alınmamıştır (Topal, 2021). Beraberinde Türkiye’de 30 büyükşehir belediyesi nezdinde yapılan inceleme çeşitli evsafa toplamda yaklaşık 18.000 adet içten konvansiyonel motorlu toplu ulaşım otobüsü kullanıldığı ancak mevcut sistemde henüz sadece 109 adet farklı evsafalarda elektrikli otobüs alınabildiği ortaya konulmuştur (Topal, 2019).

Bu çalışmada, İstanbul toplu ulaşım hizmeti için elektrikli otobüs konseptinin esas alındığı, yenilikçi bir yaklaşım ortaya konulmuştur. İETT özelinde kullanılacak araç alım ve garaj işletme / işletme modellerinin esas alan hibrit model uyarınca; içten yanmalı konvansiyonel motorlu otobüsler yerine elektrikli otobüs kullanıldığı bütüncül bakış açısı ortaya konulmuştur. Yapılan analizler doğrultusundan öngörülen model için km başına birim fiyat elde edilmiştir.

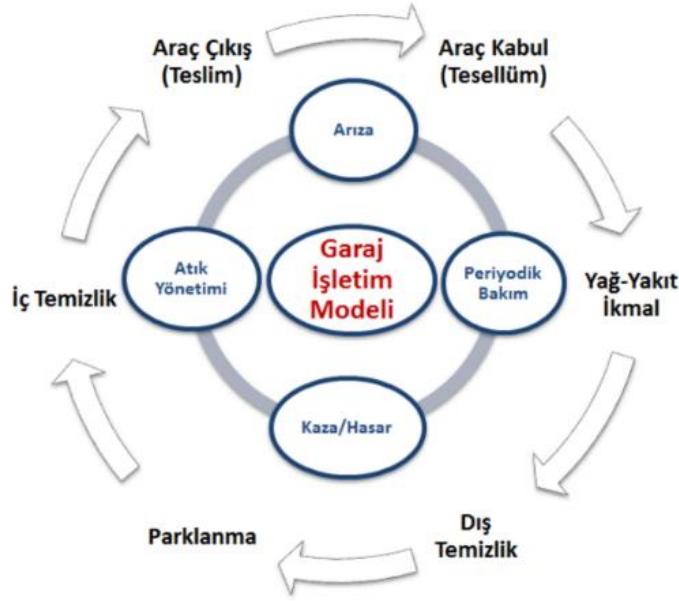
Makaleye konu model için gerçek piyasa koşullarına esas, birim maliyetler kullanılarak yaklaşım sunulmuştur. Kamu İhale Kanunu çerçevesinde gerçekleştirilen İETT ‘ye ait dizel otobüs alım ve garaj işletme / işletme maliyetleri ile ESHOT’a ait elektrikli otobüs alım maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Söz konusu ihalelerin detayları çalışmanın ilerleyen bölümlerde, dünya genelinde önemli diğer toplu ulaşım otoriteleri tarafından yürütülen farklı modellere ait uygulamalarla birlikte yer verilmiştir. Son kısımda ise makaleye konu olan hibrit yaklaşıma esas matematiksel model ortaya konularak, nihai anlamda İstanbul toplu ulaşımında, yenilikçi garaj işletme modeli için elektrikli otobüs konseptine esas km başına birim maliyet elde edilmiştir.

2.OTOBÜS ALIM VE GARAJ İŞLETME / İŞLETTİRME MODELLERİ

İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü uzun yıllar geleneksel garaj işletmeciliği çerçevesinde yürütülen çalışmalarında ilk olarak 2013 yılında değişikliğe gitmiştir. Öncelikle yeni araç alım modeli ile otobüslere verilen bakım & onarım faaliyetlerinde dış kaynak kullanımına gidilmiş; 2018 yılında da garajlarda yürütülen diğer işletme faaliyetlerinin de (araç bakım & onarım faaliyetlerinin haricindeki diğer revizyon faaliyetleri için) hizmet alımı suretiyle yürütülmesine karar verilmiştir (İETT,2021).

İETT tarafından dünyada ilk olarak 2013 yılında ortaya konulan otobüs alım modeli ile 24 aylık süre zarfında gerçekleştirilen 7 ayrı ihale doğrultusunda, filosuna 1.705 yeni otobüs ilave etmiştir. Toplamda 3 farklı araç üreticisi ile imzalanan sözleşmeler çerçevesinde 5 yıl boyunca, yakıt ve şoför maliyeti dışında hiçbir ilave gider olmaksızın toplu ulaşım araç işletme faaliyetlerin yürütülmesini esas alınan bu yeni otobüs alım modeli öncesi İETT tarafından kendi işgücü ve kaynakları ile yerine getirilen araç bakım & onarım, yedek parça temin/montajı, araçların parklanma ve temizlik hizmeti, servise sunma vb. birçok faaliyet, alım modeli çerçevesinde, aynı zamanda araç üreticileri olan tedarikçiler tarafından yürütülmüştür. İmzalanan sözleşmeler araç bedelleri ile birlikte araçların 5 yıl boyunca tüm bakım & onarım, temizlik, muayene, sigorta, vergi gibi işletmeye esas giderlerini de kapsamaktadır. Söz konusu alım modeli, tedarik edilen yeni araçlar için yine 5 yıl boyunca ihtiyaç duyulan tüm yedek parçaların da temin edilmesini, olası bir kaza durumunda aracın çekiciyle garaja getirilmesi prosesini içermektedir. Ayrıca araçların en az % 95’inin ertesi gün sefere hazır hale getirilmesini zorunlu kılan sözleşme doğrultusunda eksik kalan her bir araç için cezai müeyyideler uygulanmaktadır (İETT 2021, İETT 2018).

Aşağıda yer alan Şekil 3’de 2013 yılında İETT’de araç alım ihaleleri kapsamında uygulanan garaj işletme modeli şematize edilmiştir. Şekilde iç çemberde gündüz gerçekleştirilen süreçler, dış çemberde ise gece gerçekleştirilen süreçler belirtilmektedir.



Şekil 3. İETT'ye Ait Garaj İşletim Modeli

Gece gerçekleştirilen süreçlerde, garaj içerisindeki araçların ertesi gün servise hazırlama işlemleri tesellüm süreci ile başlayıp sırasıyla yakıt ikmal, dış temizlik, parklanma, iç temizlik, hasar bakım, servis karşılama ve son olarak aracın çıkış süreci ile sonlanmaktadır. Modelde, otobüslerin servise hazırlama işlemleri esnasında yapılan fiili kontroller ile çeşitli bakım & onarım işlemleri gerçekleştirilmesini de içermektedir. Gündüz gerçekleştirilen süreçlerde ise araçların periyodik bakım işlemleri, arıza-hasar müdahale işlemleri, garaj içerisindeki işletme faaliyetlerine yönelik diğer işlemler yürütülmektedir. Ayrıca gerekmesi durumunda acil müdahale süreci ile servis sırasında arızalanan ve/veya kaza yapan araçlar için kurulan acil müdahale ekipleri ile olay yerine ulaşma ve müdahale işlemlerinin gerçekleştirildiği (gerekirse otobüsün garaja çekilmesi) faaliyetler bu kapsamda yürütülmektedir (İETT, 2021).

İETT tarafından yapılan otobüs alımlarındaki yaklaşım esas alınarak, İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından benzer şekilde kamu ihale kanunu çerçevesinde gerçekleştirilen 12 m'lik solo elektrikli otobüs alımı yine makaleye konu modelde kullanılan birim maliyetler için referans teşkil etmektedir. Söz konusu ihale kapsamında 20 adet elektrikli otobüs ve işletme gereksinimlerine göre 22 adet şarj istasyonu temin edilmiş; beraberinde 5 yıl boyunca, günlük 250 km esas alan bakım & onarım hizmeti ve yine günlük %90'lık servis garantisi yer almaktadır (ESHOT,2021).

Bunun ile birlikte İETT tarafından ilk bakım & onarım garantili araç alım ihalelerinde sözleşme sürelerinin sonuna gelmesi ile 2018 yılında bu kez yeni garaj işletirme modeli ortaya konulmuştur. Toplu ulaşım işletmeciliğinde dünyadaki başarılı örneklerden yola çıkılarak uygulamaya konulan bu yeni işletme anlayışı, lastik tekerlekli toplu ulaşım sistemlerinde dünya genelindeki önemli şehirlerde faaliyet gösteren işletmeci ve operatörlerin garaj işletme faaliyetleri göz önünde bulundurularak, İETT'ye özgü şekillendirilmiştir.

Dünya geneline bakıldığında lastik tekerlekli toplu ulaşım sistemlerinde uygulanan garaj işletim modelleri arasında bir yeknesaklık bulunmamaktadır. Uygulamalarda farklılıklar; görev, yetki ve sorumluluk bağlamında garajlarda yürütülen tüm süreçlerin operatörün yönettiği ve uyguladığı konseptten, tamamıyla hizmet alımı şeklinde yürütülen garaj işletme modellerine kadar birçok farklı yaklaşım söz konusudur. Genel manada toplu ulaşımında kullanılan filolardaki araç sayısı, araçların yaşı, araçların yakıt türü, araç aksamalarının arızalanma sıklığı gibi çeşitli nedenlerden ötürü tek tip bir garaj işletme modeli söz konusu olmadığı değerlendirilmektedir. Bu minvalde

operatör/otoritelerin ufak kapasiteli, çok sayıda araç bulunan garajlar ile bazılarının da ise yüksek araç kapasiteli büyük ama az sayıda garaj ile toplu ulaşım işletme faaliyetleri yürüttüğü bilinmektedir (İETT İhale, 2021), (İETT, 2018).

Toplu ulaşım işletme otoriteleri/operatörleri için genel çerçevede garaj işletim faaliyetleri destek, operasyonel ve bakım & onarım olmak üzere 3 temel kategoride yürütülmektedir. Destek faaliyetleri kapsamında yağ/yakıt ikmal, araç temizlik ve ücret toplama sistemlerin faal halde tutulmasına yönelik süreçler yer almaktadır. Operasyonel faaliyetlerde ise servis sırasında olası kaza veya arıza vb. durumlarda araca müdahale edilerek, mümkünse arızanın giderilmesi, mümkün değilse garaja çekilmesi suretiyle işletmeye esas süreçleri kapsamaktadır. Son olarak garaj işletmeye esas en temel fonksiyon olan bakım & onarım faaliyetleri için araçları faal durumda tutmak adına bakım, arıza tespit ve onarım olmak üzere 3 alt unsur nezdinde çalışmalar yürütülmektedir.

Literatürde yer alan garaj işletme modellerine esas destek, operasyonel ve bakım & onarım faaliyetleri ile ilgili görev, yetki ve sorumlulukların dağılımına dair dünya genelinde seçilen bazı şehirlerdeki toplu ulaşım işletmecilerince yürütülen faaliyet dağılımı göz önünde bulundurularak elde edilen örneklem Tablo 1’de özet halde sunulmuştur. (Basagaña ve ark., 2018),(Göhlich ve ark., 2014), (Alves ve ark. 2012), (Shrivastava ve O'Mahony 2005),(Amador-Jimenez ve Christopher 2016), (Chowdhury ve ark.,2018), (Tirachini ve ark., 2010), Debnath ve ark.,2014).

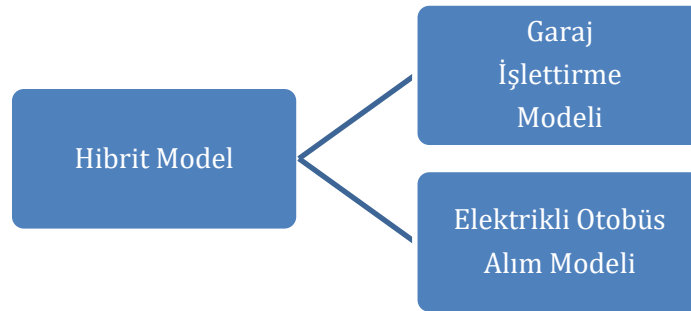
Tablo 1. Dünya Geneli Toplu Ulaşım Otoriteleri/Operatörleri için Garaj İşletme Faaliyetleri Dağılımı

İşletme Konusu	Faaliyet	Barselona	Berlin	Dublin	Lizbon	Madrid	Montreal	Paris	Sydney
Destek	Yağ/Yakıt İkmal	O	T	G	T	G	G	T	G
	Araç Temizliği	G	T	G	T	G	G	T	G
	Ücret Toplama Sistemi	Y	Y	O	T	Y	G	Y	Y
Operasyonel	Acil Müdahale	O	G	G	G	O	G	G	G
Bakım & Onarım	Yenileme	G – T	Y	G	M	G	M	Y	T
	Boya	G – T	M	T	M	G	M	G – M	G – T
	Kaporta	G – T	M	G	G-M-T	G	G	M	G – T
	Motor Rektifiye	G	G	T	M	M	M	T	T
	Lastik	T	T	T	T	G – M	M	M	T
	Fren	M	G	G	G	G – M	M	G	G
	Haberleşme Sistemleri	M	T	T	T	T	M	M – T	G
	Kamera Sistemleri	Y	T	G	T	G	M	G – M	T
	Klima	T	G	G	G – M	G	G	M	T
	Şanzıman	M – T	G	Y	M	M	Y	M	T

Yukarıdaki yer alan Tablo 1 ‘de garaj sorumluluğu (G), operasyon sorumluluğu (O), bakım & onarım sorumluluğu (M) ve hizmet alımı (T) harflerle ifade edilmiştir. Faaliyet yürütülmeyen alanlarda ise (Y) harfi kullanılmıştır.

İETT tarafından garaj işletirme yaklaşımına esas ilk uygulama Kurtköy, sonrasında Ayağaza garajlarında yürürlüğe konulmuştur. Bu model doğrultusunda araçların akaryakıt, bakım & onarım, yakıt/yağ ikmal, temizlik ve diğer servise hazırlama hizmetleri ile otobüslerin kullanımı için şoförlük hizmeti dahil faaliyetler tamamen yükleniciye devredilmiştir. Verilen hizmetin karşılığı olarak yükleniciye modelde esas alınan kilometre başına birim fiyatı ödemesi yapılmaktadır. Söz konusu modelde otobüslerin ve garajların mülkiyeti ile yolculuk gelirleri ise İETT'ye aittir (İETT, 2020).

İETT ve ESHOT tarafından gerçekleştirilen ve detaylarına yer verilen otobüs alım ve garaj işletme/işletirme modelleri esas alınarak, lastik tekerlekli toplu ulaşım sistemleri için uygulanabilir, elektrikli otobüsleri esas alan holistik yaklaşımla aşağıda yer alan Şekil 4'deki hibrit model ortaya konulmuştur.



Şekil 4. Hibrit Model Yaklaşımı

3. HİBRİT MODELİN YAKLAŞIMI

Bu kısımda ortaya konulan hibrit model kuramı detaylandırılmıştır. Mevcut durumda İETT tarafından garaj işletirme modeli çerçevesinde hizmet sunulan iki garajdan biri olan Kurtköy garajındaki araç ve sefer sayıları ile işletme planları esas alınarak modellemeye örneklem sağlanmıştır. Bu kapsamda Kurtköy garajının mevcut sistemi için tamamen elektrikli otobüslerle müteşekkil bir garaj konsepti öngörüsü ile modele yaklaşım sunulmuştur.

Kurtköy Garajında hizmet veren İETT'ye ait otobüsler için belirlenen 72 hat üzerinde toplamda 1.906 km'lik hizmet ağı söz konusudur. Bu hatlar için ortalama menzil değeri tek yön için 26,5 km olup, toplamda 53 km'lik hat uzunluğu esas alınmıştır. Listedeki en yüksek menzil gereksinimine ihtiyaç duyulan hat tek yön 42.4 km uzunluğu ile 132 D Kurtdoğmuş / Ballica – Kartal hattı olup, iş günlerinde 2 adet 12 m solo otobüs ile toplamda 8 sefer yapılarak hizmet sağlandığı bildirilmiştir (İETT Kurtköy Planlama Hat İşletme Planlanmaları, Ocak –Mart 2019). Kurtköy garajında verilen toplu ulaşım hizmeti kapsamında modele esas en kritik konu, söz konusu hatların, seçilen elektrikli otobüs konseptine uygunluğudur. Zira belirlenecek elektrikli otobüs yapısına göre tercih edilen şarj konsepti, enerji altyapı ve batarya kapasitesi vb. parametrelerin, hizmet verilen hatlara ve hatların işletme planlarına uygunluğu son derece kritik öneme sahiptir.

Öngörülen yaklaşıma referans teşkil etmesi adına ilk olarak kullanılacak elektrikli otobüs konsepti için Kurtköy garajında hizmet veren bütün hatlarda uygunluğu değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda elektrikli otobüsler için yüksek batarya kapasiteli, yavaş şarj konsepti (depoda-geceden şarj) ile düşük batarya kapasiteli, hızlı şarj konsepti (hat başı/sonunda hızlı şarj istasyonu konuşlandırılarak), Kurtköy Garajı sorumluluk sahası için karşılaştırılmıştır. Burada her iki elektrikli otobüs konseptine de ilgili hatların uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu çalışmaya esas analizlerde Türkiye'de bugüne kadar alımı gerçekleştirilen yüksek batarya kapasiteli ve geceden

şarj konseptini esas alan elektrikli otobüsler ile girdi sağlanmıştır. Ancak nihai olarak elektrikli otobüs konseptine göre optimum şarj istasyon ve batarya kapasite hesabı ayrıca ve detaylı olarak göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Türkiye’de toplu ulaşım otoriteleri nezdinden ilk olarak İETT tarafından Kurtköy garajına esas gerçekleştirilen 2018/387031 kayıt numaralı ihalede yer alan parametre ve maliyetler, çalışmaya esas analizlerde göz önünde bulundurulmuştur. Söz konusu ihale 17.252.550 km ‘lik şehir içi toplu taşıma hizmetini 239 adet araç ile sağlanılmasını öngörmektedir. Bu kapsamda şoför, akaryakıt ve madeni yağlar ikmal, bakım & onarım, servise hazırlık faaliyetlerini 01.10.2018 - 30.09.2019 tarihlerini esas alacak şekilde sözleşme imzalanmıştır. İhale kapsamında İETT tarafından belirlenen çalışma çizelge ve işletme koşullarına uygun olarak, İdareye ait toplamda 239 adet 12 m’lik solo otobüslerle Anadolu yakası Kurtköy Garajında, araçların minimum hafta içi 97 %’si, hafta sonu ve resmi tatil günlerinde %88’i ile servis verilmesi istenilmiştir. İşin toplam süresi olan 1 takvim yılı içerisinde hafta içi 218, cumartesi ve pazar 211 araçla, her türlü gider yükleniciye ait olmak üzere, belirlenen km değerinin kat edilmesi hususu sözleşmeye bağlanmıştır. Otobüslerle yapılacak km’ye göre ödemeler aylık olarak gerçekleştirileceği, otobüs ve garajların mülkiyete İETT ait olduğu ifade edilmiştir. Sözleşmeye binaen ortaya çıkan hakedişlere esas ödemeler km başına 0,97 Dolar olduğu toplam ihale bedeli üzerinden hesaplanmıştır (İETT İhale, 2021).

Berberinde elektrikli otobüse dair birim maliyetler için; İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından gerçekleştirilen 12 m’lik solo elektrikli otobüs alımı ihalesi referans alınmıştır. İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından 2016/147513 ihale kayıt numarası ile gerçekleştirilen Elektrikli Otobüs (Şarj Üniteleri ile Birlikte) Alımı İş ihalesi kapsamında 20 adet elektrikli otobüs ve işletme gereksinimlerine göre 22 adet şarj istasyonu temin edilmiştir. İmzalanan sözleşmeye göre bir önceki bölümde ifade edildiği üzere elektrikli otobüsler için 5 yıl boyunca 250 km/gün esas alan bakım & onarım maliyetleri ve günlük 90 %’lik servis garantisi dahil edildiği bilinmektedir. Diğer taraftan teknik şartnamede belirtilen işletme koşulları esas alınarak araç başı günlük 250 km menzil sağlanması istenilmiştir.

Bu koşullar doğrultusunda imzalanan sözleşmeye göre araç başı 440.000 Euro maliyet kalemi işbu çalışmaya esas yapılan analizlerde kullanılmıştır (ESHOT İhale, 2021).

Ayrıca Türkiye’de ilk olarak elektrikli otobüslere dair gerçek işletme koşullarını esas alan yaklaşımları literatüre kazandıran, yine İETT nezdinden yürütülen çalışmalar neticesinde elektrikli otobüslerin İstanbul toplu ulaşımının gerçek işletme şartları altında, km başına bakım & onarım ve yakıt (enerji) tüketim maliyetlerinin yol, zaman ve yolculuk koşullarına göre değişimlerinin ölçümleri de bu makale çalışmasında kullanılmıştır (Topal ve ark. ,2018). Diğer taraftan İzmir Büyükşehir Belediyesi tarafından 2017 yılının Nisan ayından itibaren etkin bir şekilde kullanılan elektrikli otobüslere dair elde edilen 4 yıllık gerçek işletme koşullarına sari veriler de göz önünde bulundurulmuştur (Önçağ ve ark. ,2021).

Aşağıda yer alan Tablo 2’de öngörülen hibrit modele esas idare/yüklenici görev, yetki ve sorumluluk dağılımları sunulmuştur. Yapılan analizler de esas alınan ve yukarıda detaylarına yer verilen elektrikli ve dizel otobüs alım ve dizel otobüslerle garaj işletmeye ait dair maliyetler Tablo 3’de yer almaktadır.

Ortaya konulan hibrit yaklaşım için İETT tarafından gerçekleştirilen garaj işletme modeline esas maliyet kalemleri detaylandırılarak, alt bileşenler elde edilmiştir. İhaleye esas imzalanan sözleşme kapsamında yüklenici tarafından İdareye ait Kurtköy Garajında, tahsis edilen otobüslerle İdare tarafından belirlenen güzergâhlarda ve işletme planına uygun olarak toplu ulaşım hizmeti sunulmasını ve işin bitiminde araçların teslim edilmesini kapsamaktadır. Ayrıca sözleşmeye esas otobüslerin periyodik bakımları, arıza/hasar onarımları, garaj içi parklanmaları, araçların servise

hazır olması için yağ/yakıt ikmalleri, iç/dış temizlikleri, gerekmesi durumunda yol yardım hizmeti, garaj açık ve kapalı alanlarının temizlikleri, yakıt dahil her türlü sıvı (madeni yağlar, can suyu, antifriz vb.) ürünlerin tedariki, devamlı suretle tamamlanmasını ile her türlü garaj işletme ve operasyon maliyetlerinin karşılanması model kapsamında yükümlülükler dahil edilmiştir. Kurtköy garajında sunulan toplu ulaşım hizmeti, toplamda 239 adet dizel otobüs ile yıllık 17.252.550 km toplu ulaşım hizmeti sağlanması üzerinde kurgulanmıştır. Bu evsafa araç başı günlük ortalama 198 km'lik toplu ulaşım hat planlaması hesaplanmıştır. Kurtköy Garajı, hat işletme planlarına esas alınarak km başına garaj işletirme maliyeti için (1) nolu denklem elde edilmiştir.

$$GKM \times OS \times D \times OP_{iett} \times OppC_{dizel} = M1 \quad (1)$$

Garaj işletirme maliyetine esas (1) nolu denklem için;

GKM araç başı günlük gerçekleştirilen işletme esas (km) cinsinden menzil değerini,
OS işletmeye esas servise verilen 12 m solo otobüs sayısını,
D bir işletme yılı içerisindeki gün sayısını,
OP_{iett} İETT 'nin Kurtköy Garajındaki araçlar için öngörülen ortalama performans katsayısını,
OppC ise Kurtköy Garajı için belirlenen koşullar altındaki km başına işletirme maliyetini ifade etmektedir.

M1 ise Kurtköy Garajı için 2018/387031 ihale kayıt numarası ile 11.10.2018 tarihinde imzalanan sözleşmeye esas ihale bedelidir. Garaj işletirme maliyeti için ortaya konulan (1) nolu denklem için göre 365 günü esas alan 17.252.550 km'lik işletme planı için öngörülen 239 adet, 12 m 'lik solu dizel otobüs için 0,83 Euro/ km (5,79TL / km) birim maliyet belirlenmiştir. Bu koşullar için araçların 100 % performansla işletildiği yaklaşımı için 198 km/ gün-araç başına menzil değeri hesaplanmıştır.

$$OppC_{dizel} = DC + FOC + M\&R_{C_{dizel}} \times OC \quad (2)$$

Yukarıda yer verilen (2) nolu denklemde ise km başı garaj işletirme maliyetine esas (1) nolu denklem içinde yer alan Kurtköy Garajı için belirlenen koşullar altındaki km başına işletirme maliyeti (OppC_{dizel}) ne dair yaklaşımı esas alan maliyetler hesaplanmıştır. Denklemde birim maliyetlere karşılık gelen parametreleri için;

DC, km başına şoförlük hizmet maliyetini,
FOC, akaryakıt (motorin) ve yağ ikmal maliyetini,
M&R C dizel dizel otobüs için km başına bakım & onarım maliyetini,
OC ise km başına diğer işletme maliyetlerini ifade etmektedir.

Hibrit yaklaşıma esas ikincil kuram için ESHOT tarafından gerçekleştirilen 2016/147513 nolu elektrikli otobüs alım ihalesi esas alınarak kurulan Türkiye'nin ilk elektrikli otobüs filosu için 20.07.2016 tarihinde imzalanan sözleşmesine göre 20 adet elektrikli otobüsün, 5 yıl boyunca her türlü bakım & onarım dahil olarak alınması ve ESHOT performans kriterlerine sari işletme koşulları altında toplam 22 adet şarj istasyonu ile günlük en az 250 km 'lik menzil sağlanması istenildiği belirtilmiştir. Buna göre elde edilen (3) nolu denklem için;

$$GKM \times OS \times D \times OP_{eshot} \times OC_{elektrikli} = M2 \quad (3)$$

Elektrikli otobüslere esas (3) nolu denklemde yer alan maliyet parametreleri için;

GKM, araç başı günlük gerçekleştirilen işletme esas (km) cinsinden menzil değerini,

OS, işletmeye esas servise verilen elektrikli otobüs sayısını,
 D, bir işletme yılı içerisindeki gün sayısını,
 OPeshot, ESHOT 'un elektrikli otobüsler için öngörülen ortalama performans katsayısını,
 OCElektrikli, ESHOT'un belirlenen koşullar altındaki km başına elektrikli otobüs işletme maliyetini,
 M2 ise ESHOT tarafından 2016/147513 ihale kayıt numarası ile 03.06.2016 tarihinde gerçekleştirilen ihale bedelini ifade etmektedir.

$$OCElektrikli = FOC + M\&R\text{ Elektrikli} \times OC \quad (4)$$

Yukarıda yer verilen (4) nolu denklem için ESHOT'un belirlenen koşullar altındaki km başına işletme maliyeti ($OC_{\text{elektrikli}}$) hesaplanmıştır. Önceki yaklaşımdan farklı olarak ESHOT'un aldığı elektrikli otobüsler için imzalanan sözleşme çerçevesinde, ilgili teknik şartnameye esas km başına elektrikli otobüs işletme birim maliyetleri elde edilmiştir. Bu kapsamda km başına elektrikli otobüs işletme maliyeti için;

OCElektrikli, elektrikli otobüs için km başına toplam işletme maliyetini,
 FOC, elektrikli otobüs için km başına enerji tüketim maliyetini,
 M&R Elektrikli, elektrikli otobüs için km başına bakım & onarım maliyetini,
 OC, elektrikli otobüs için km başına diğer işletme maliyet değerini ifade etmektedir.

Nihai olarak İETT ve ESHOT tarafından imzalanan sözleşmeler doğrultusunda, gerçek maliyet kalemleri baz alınarak ortaya konulan hibrit model yaklaşımı için (5) nolu denklem ortaya konulmuştur. Buna göre yukarıdaki denklemlerde elde edilen değişkenler göz önünde bulundurularak; elektrikli otobüslerle sunulacak anahtar teslim toplu ulaşım hizmeti için km başına birim maliyet elde edilmiştir. Öngörülen dinamik modele esas nihai işletme planlaması için İETT Kurtköy Garajının mevcut koşulları esas alınmıştır. Buna göre;

$$GKM \times FOC \times D \times OPiETT \times [DC + EC + M\&RC_{\text{elektrikli}} \times OC] = M3 \quad (5)$$

GKM, araç başı günlük gerçekleştirilen işletme esas (km) cinsinden menzil değerini,
 OS, işletmeye esas servise verilen elektrikli otobüs sayısını,
 D, bir işletme yılı içerisindeki gün sayısını,
 OPiETT, İETT için Kurtköy Garajı İşletme planına esas elektrikli otobüslerle öngörülen ortalama performans katsayısını,
 DC, km başına şoförlük hizmet maliyetini,
 FOC, elektrik enerji birim maliyetini,
 M&R Elektrikli, elektrikli otobüs için km başına bakım & onarım maliyetini,
 OC, elektrikli otobüsler için km başına diğer işletme maliyetlerini,
 M3 ise İETT Kurtköy Garaj İşletme koşulları için elektrikli otobüslerle verilecek anahtar teslim toplu ulaşım hizmet maliyetini ifade etmektedir.

Tablo 2. Toplu Ulaşım İşletmelerinde Kullanılan Model Yaklaşım Faaliyet Dağılımı

Konsept	Araç Türü	Garaj	Araç	Şoför	Bakım & Onarım	Destek	Operasyonel
Garaj İşletirme Modeli (İETT)	DİZEL	İDARE	İDARE	HİZMET	HİZMET	HİZMET	HİZMET
Araç Alım Modeli ¹ (İETT)	DİZEL	İDARE	TEDARİK	İDARE	HİZMET	HİZMET	HİZMET
Araç Alım Modeli ² (ESHOT)	ELEKTRİKLİ	İDARE	TEDARİK	İDARE	HİZMET	HİZMET	HİZMET
Öngörülen Hibrit Model	ELEKTRİKLİ	İDARE*	TEDARİK	HİZMET	HİZMET	HİZMET	HİZMET

Tablo 3. Modellerde Kullanılan Faaliyetler ve Model Parametreleri

Konsept	Araç Türü	Gerçekleşen km/gün-araç (TOPLAM)	Araç Sayısı	Ödeme - km başına-	Sübvansiyon	Araç Maliyet	Garaj	Şoför	Bakım & Onarım †	Yakıt / Yağ İkmal	Araç Temizlik	Acil Müdahale	Parklanma Hizmeti	Altyapı Kurulum
(1) Garaj İşletirme Modeli	Dizel	198	239	0,97 \$	YOK	YOK	İDARE	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	İDARE	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YOK
(2) Araç Alım Modeli	Elektrikli	250	20	YOK	YOK	440.000 Euro ‡	İDARE	İDARE	YÜKLENİCİ	İDARE	YÜKLENİCİ	YOK	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ §
(3) Hibrit ** Model	Elektrikli	200	239	YOK	VAR	0	İDARE	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ	YÜKLENİCİ

* Sadece bina ve fiziki alanları İdare sağlayacak olup, özellikle şarj altyapısı için tedarikçi hizmet alınmak suretiyle faaliyetler yürütülecektir.

† Boya, kaporta, motor rektifiye, lastik, fren, haberleşme sistemleri, kamera sistemleri, klima, şanzıman vb. sistemler bakım & onarım kapsamında değerlendirilmektedir.

‡ 5 yıl boyunca bakım & onarım dahil maliyetdir.

§ İhale kapsamında toplamda 22 adet şarj istasyon kurulumu yer almaktadır.

** Kurtköy Garajı ha işletme planlaması esas alınarak modelleme gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda (1) ve (2) nolu denklemler için M1 maliyeti esas alınarak dizel otobüslere dair garaj işletme maliyetleri içerisinde şoför, yakıt/yağ ikmal, bakım & onarım maliyeti (dizel otobüslere esas) ve diğer işletme maliyetleri için km araç başına 0.83 Euro hesaplanmıştır. Ayrıca (3) ve (4) nolu denklemler için ise M2 maliyeti esas alınarak elektrikli otobüslerin maliyeti dahil 5 yıl boyunca elektrikli otobüsler için bakım & onarım maliyeti ve diğer işletmeleri için araç başına 0.96 Euro/km olarak hesaplanmıştır. Buradan kurulan yaklaşım ile elektrikli otobüsler için toplamda 5 yılı esas alan bakım & onarım maliyeti için diğer işletme maliyetleri dahil olmak üzere araç başına 0.12 Euro/km değeri modeled kullanılmıştır. Maliyetlere esas alt bileşenlerden km başına şoför maliyetini hesaplamak için dizel otobüsler için belirlenen ortalama bazda bakım & onarım maliyeti için 0,10 Euro/km ve yine dizel otobüsler için ortalama akaryakıt (motorin) tüketimi olan 0,33 Euro/km esas alınarak ortalama 0.40 Euro/km elde edilmiştir. Diğer taraftan (3) ve (4) nolu denklemler için M2 maliyetine esas elektrikli otobüsler için enerji tüketim maliyeti 0.08 Euro/km; elektrikli otobüs maliyeti (12 m solo) ile 5 yılı esas alan bakım & onarım maliyeti ve diğer işletme giderleri ise 0,96 Euro / km (günlük 250 km menzil koşulları için) olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bütün veriler kullanılarak (5) nolu denklem için İETT Kurtköy Garajı işletme planlarını esas alan elektrikli otobüs işletme maliyeti araç başı 1.45 Euro / km olarak ortaya konulmuştur. Burada şoför maliyeti, elektrikli otobüsler için enerji maliyeti (elektrik) ve bakım & onarım maliyeti son olarak da diğer işletme maliyetlerini kapsayan anahtar teslim toplu ulaşım işletmesi yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu koşullar altında 1 yıllık Kurtköy Garajı işletme planını baz alınarak, toplam maliyet 25.016.197,50 Euro olarak hesaplanmış; 239 adet elektrikli otobüs ile yapılması durumunda 1.437.713 km toplu ulaşım hizmeti için 2.084.683,13 Euro aylık hakediş ödemesi gerektiği belirlenmiştir.

Model nezdinde 3 ila 5 yıllık toplam sözleşme süreleri esas alınarak sunulan yaklaşımlarda, analiz çalışmaları için kamu ihale kanunu sınır değerleri ve yerel yönetimler için belirlenen standart seçim dönemleri esas alınmıştır. Model çerçevesinde özellikle 5. yılın sonunda otobüslerin ilgili İdareye verilmesini öngörülürken, uzun dönemli ve hizmet endeksli bir elektrikli otobüs tedarik yöntemi olarak da literatüre kazanım sağlanmıştır.

4. SONUÇLAR

İstanbul özelinde geliştirilen hibrit model, lastik tekerlekli kamu toplu ulaşım sistemleri için elektrikli otobüs konseptini esas alan bütüncül bakış açısına sahip, sıfır emisyonlu ve sürdürülebilir toplu ulaşım yaklaşımı geçerli kılmaktadır.

Referans alınan İETT ve ESHOT 'a dair maliyetler ve öngörülen İETT toplu ulaşım işletme planı örneklemini için 1,45 Euro/km birim maliyet ile elektrikli otobüslerin baz alındığı anahtar teslim toplu ulaşım hizmeti sağlanabileceği ortaya konulmuştur. Bu sonuç İstanbul lastik tekerlekli toplu ulaşım sistemi için etkin, verimli ve sürdürülebilir bir yaklaşım fırsatı sunmaktadır.

Elektrikli otobüslerle anahtar teslim toplu ulaşım işletme anlayışını esas alan model mevcut durumda filolarında elektrikli otobüs bulunmayan İETT ve EGO gibi toplu ulaşım otoriteleri için farkındalık sağlamak adına önem teşkil etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmada sunulan destekten ötürü İETT Genel Müdürlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Alves, D., Martinez, L. M., & Viegas, J. M. (2012). Retrieving real-time information to users in public transport networks: an application to the Lisbon bus system. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 470-482.
- Amador-Jimenez, L., & Christopher, A. (2016, August, 20-22). *A comfort index for public transportation: Case study of Montreal*. In 2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE), IEEE, 3-7.
- Baraçlı, H. (2012). Türkiye’de Toplu Taşımacılıkta Bir Öncü Kuruluş: İETT (İstanbul Elektrik, Tramvay, Tünel İşletmeleri) XIX. Yüzyıl. *Muhasebe ve Finans Tarihi Araştırmaları Dergisi*, 3, 19-40.
- Basagaña, X., Triguero-Mas, M., Agis, D., Pérez, N., Reche, C., Alastuey, A., & Querol, X. (2018). Effect of public transport strikes on air pollution levels in Barcelona (Spain). *Science of the total environment*, 610, 1076-1082.
- Chowdhury, S., Hadas, Y., Gonzalez, V. A., & Schot, B. (2018). Public transport users' and policy makers' perceptions of integrated public transport systems. *Transport Policy*, 61, 75-83.
- Debnath, A. K., Chin, H. C., Haque, M. M., & Yuen, B. (2014). A methodological framework for benchmarking smart transport cities. *Cities*, 37, 47-56.
- ESHOT Genel Müdürlüğü, (2022). Elektrikli Otobüs (Şarj Üniteleri İle Birlikte) Alımı İşi İhale Dosyası, Kamu İhale Kurumu İhale Sorgulama sayfası <https://www.kik.gov.tr/ihalesorulama> adresinden 05 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- Göhlich, D., Kunith, A., & Ly, T. (2014). Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin. *WIT Trans. Built Environ*, 138, 137-149.
- İstanbul Yıllık Ulaşım Raporu (2017). İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Dairesi Başkanlığı, Toplu Ulaşım Hizmetleri Müdürlüğü https://tuhim.ibb.gov.tr/media/2171/%C4%B0bb-ula%C5%9Fim-raporu-2017-tr_son.pdf adresinden 25 Ağustos 2021 tarihinde alınmıştır.
- İETT (2017). İETT İşletmeleri Genel Müdürlüğü 2017 Faaliyet Raporu, adresinden 15 Eylül 2022 tarihinde alınmıştır.
- İETT (2019). Kurtköy Planlama Hat İşletme Planlanmaları Ocak –Mart, İETT, İstanbul.
- İETT (2021). Toplu Ulaşımında Modlar Arası Entegrasyon Vizyonu Ortak Akıl Konferansı Sonuç Raporu. *İETT*, İstanbul.
- İETT (2022). İşletmeleri Genel Müdürlüğü Kurumsal Bilgiler, <https://iett.istanbul/tr> adresinden 05 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.

- İETT İhale (2022). İETT Genel Müdürlüğü Kurtköy Garajı İşletirme İhale Dosyası Kamu İhale Kurumu İhale Sorgulama sayfası <https://www.kik.gov.tr/ihalesorulama> adresinden 10 Kasım 2022 tarihinde alınmıştır.
- Karakaya, Z. Ö. (2020). *Büyükşehir belediyelerinde lastik tekerlekli ulaşımda hakediş modeli: İstanbul örneği* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Önçağ, A. Ç., Üzkat, H., Yeşil, Z. C., & Eliyi, U. (2021). Elektrikli otobüsler üzerine karşılaştırmalı bir değerlendirme: İzmir şehir içi saha analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 43-51.
- Shrivastava, P., & O'Mahony, M. (2005). Modeling an integrated public transportation system-a case study in Dublin, Ireland. *European Transport\Trasporti Europei*, 41(41), 28-46.
- The International Energy Agency, (2022). Data and Statistics, IEA CO₂ Emissions from Fuel Combustion <https://www.iea.org/subscribe-to-data-services/co2-emissions-statistics> adresinden 05 Mart 2022 tarihinde alınmıştır.
- Tirachini, A., Hensher, D. A., & Jara-Díaz, S. R. (2010). Comparing operator and users costs of light rail, heavy rail and bus rapid transit over a radial public transport network. *Research in transportation economics*, 29(1), 231-242.
- Topal, O. (2019). Türkiye Toplu Ulaşım Sisteminde Elektrikli Otobüsler. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 15, 155-167.
- Topal, O., & Nakir, İ. (2018). Total cost of ownership based economic analysis of diesel, CNG and electric bus concepts for the public transport in Istanbul City. *Energies*, 11(9), 2369.
- Topal O. (2021). İstanbul Lastik Tekerlekli Toplu Ulaşım Sistemlerinde Özel Halk Otobüsleri için Elektrikli Otobüs Konsepti. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (31), 968–973.
- Zimmermann, M., Van Begin, G., & Cristóbal, I. V. (2010). The International Local Government Climate Roadmap. Local Governments and Climate Change, Dordrecht, Heidelberg, London and New York, *Springer*, 79-89.



Araştırma Makalesi / Research Article

**KENT İÇİ ULAŞIM PROJELERİNDE MİKROSİMÜLASYON
YÖNTEMİNİN KULLANILMASI:
ESENYURT AHMET ARİF CADDESİ ÖRNEĞİ***

**USING MICROSIMULATION METHOD IN URBAN TRANSPORTATION PROJECTS:
THE CASE OF ESENYURT AHMET ARİF CADDESİ**

Menekşe ŞEKER MURAT¹

Leyla SURİ²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1150425>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
menekseker@gmail.com

Geliş Tarihi / Received
28.07.2022

Kabul Tarihi / Accepted
17.10.2022

Öz

İstanbul metropolünde, nüfus ve yerleşim alanlarının artması, ulaşım sorunlarının da büyümesine neden olmaktadır. Kentin hem günümüzdeki sorunlarının çözümü için hem de gelecekte karşı karşıya kalabileceği tehditlere karşı kapsamlı bir ulaşım planlamasına gereksinimi vardır. Ulaşım planlama sürecinde trafik mühendisliği çalışmaları ile tasarımlar yapılarak planlama kararları öngörülmelidir. Planlama çalışmalarının yürütülmesinde akılcı ve kalıcı kararlar verilebilmesi için bilimsel metodlardan faydalanılması gerekmektedir. Planlama kavramı uzun, orta ve kısa olmak üzere üç farklı şekilde ele alınmaktadır. Kısa vadeli çözüm önerilerinin değerlendirilmesinde ve kısıtlı bir (kavşak, koridor gibi) alanı kapsayan mikro simülasyon bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır. Çalışma kapsamında modelleme yöntemi olan simülasyon ele alınmış ve mikro ölçekli bir simülasyon modeli oluşturulmuştur. Trafik sorunlarına yönelik üretilen bir projenin analizi yapılarak mevcut durumun ve öneri projenin performansı değerlendirilmiştir. Bu sonuçlara göre öneri modelimizin mevcut duruma göre yaklaşık olarak ortalama gecikme süresinde %27, ortalama durma sayısında %43, ortalama hız değerinde %15, toplam gecikme süresinde %10, toplam gecikme süresinde %27 ve toplam seyahat süresinde %5 daha iyi sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda mikro ölçekli model yönteminin ulaşım planlaması süreçlerine dahil edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kent içi ulaşım, mikro ölçekli trafik simülasyonu, performans kriterleri, ulaşım projeleri.

Abstract

The increase in population and residential areas in the Istanbul metropolis causes transportation problems to grow. The city needs a comprehensive transportation planning both for the solution of its current problems and for the threats it may face in the future. In the transportation planning process, planning decisions should be foreseen by making designs with traffic engineering studies. In order to make rational and permanent decisions in the execution of planning studies, it is necessary to benefit from scientific methods. The concept of planning is handled in three different ways as long, medium and short. Micro-simulation, which covers a limited area (such as intersection, corridor) and evaluates short-term solution proposals, is the main subject of this study. Within the scope of the study, simulation, which is a modeling method, was discussed and a micro-scale simulation model was created. The current situation and the performance of the proposed project were evaluated by analyzing a project produced for traffic problems. According to these results, our recommendation model achieved approximately 27% better results in average delay time, 43% in average number of stops, 15% in average speed, 10% in total delay time, 27% in total delay time and 5% in total travel time compared to the current situation. detected. As a result of the study, it was emphasized that the micro-scale model method should be included in the transportation planning processes.

Keywords: Microscopic traffic simulation, performance criteria, transportation projects, urban transportation.

*Bu yayın Menekşe ŞEKER MURAT isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kentsel Sistemler ve Ulaştırma Yönetimi Anabilim Dalı, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. menekseker@gmail.com, [Orcid.org/0000-0001-9420-4546](https://orcid.org/0000-0001-9420-4546).

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Küçükyalı, İstanbul, Türkiye. lsuri@ticaret.edu.tr, [Orcid.org/0000-0002-3225-1221](https://orcid.org/0000-0002-3225-1221).

1. GİRİŞ

Kent içi ulaşım, kentsel yaşamın yaya ve taşıt hareketlerinden, arazi kullanımına kadar ulaşım alt ve üst yapılarına ilişkin kapsamlı planlanması gereken bir sistemdir.

Kentsel ulaşımın planlanması, bir kentin ulaşım ana planından veya imar planının ulaşım ile ilgili kararlarından, bir yaya alanının, bir kavşağın planlanmasına kadar, değişik nitelikli ulaşım araştırmaları ve farklı ölçeklerde proje tasarımlarıyla ilgilidir. Kentsel gelişmeyi belirleyen imar planlarının iskeleti sayılan yol ağını belirleyecek ulaşım planlaması planlama hiyerarşisi içinde vazgeçilmez bir ögedir. Kent içi ulaşım projeleri kapsamında; ana caddeler, imar bölgesini aşan toplayıcı caddeler, imar bölgesi için toplayıcı yollar, dağıtıcı yollar, ara (tali) sokaklar, taşıt ve yayanın birlikte kullandığı ara yollar, yaya caddeleri, konut bölgesi yaya yolları, bisiklet yolları düşünülebilir.

Kentlerde nüfus artış hızına ve aşırı nüfus yığılmalarına bağlı olarak arazinin izin verdiği ölçüde yaşam alanlarının genişlediği görülmektedir. Bu durum mekânsal büyümeyi ortaya çıkarmış mekânsal büyüme ekonomik ve sosyal faaliyetlerin büyümesine sebep olmuştur. Büyüme hızının artışına bağlı olarak kentlerdeki yaya ve araç hareketliliği artmış ve ulaşım sorunları meydana gelmiştir. Bu sorunlar yaşam kalitesini düşürmektedir ve en önemlileri; trafik sıkışıklığı, trafik kazalarının artması, otopark yetersizliği, zaman kaybı hava ve gürültü kirliliği olarak sıralanabilir. Tüm bu sorunların çözümlerine yönelik kentlerde planlama çalışmalarına ihtiyaç artmaktadır. Bu sorunların çözümleri için geliştirilen projelerde farklı disiplinlerle birlikte çalışmaların yapılmaması, sorunun çözümü için geçici düzenlemeler yapıp uzun vadeli planlar içinse gerekli yatırımların yapılamaması kent içi ulaşım sorunlarının daha da artmasına sebep olmaktadır.

Ulaşım ve trafik sorunları ülkemizde tek bir kurum üzerinden ele alınmamakta olup, parçacı bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Bu sebeple istenilen sonuçlara ulaşmak güçleşmektedir. Kapsamlı ve bir bütün olarak yapılması gereken planlama çalışmaları yetersiz olup, geleceğe yönelik planlama kararları alınmamaktadır.

Ulaşımında planlama noktasındaki eksiklerin yanı sıra ulaşım ya da trafik düzenleme projeleri uzun vadede etkileri olan ve maliyeti yüksek olan yatırımlardır. Aynı zamanda geri dönüşü olmayan sonuçları meydana getirebilmektedir. Bu yüzden doğru olarak belirlenen öncelikler için en fazla yarar sağlayacak şekilde ekonomik kaynakların kullanılması çok önemlidir. Maliyet ve zaman kayıplarının önüne geçilmesi için ulaşım modellemenin entegre edilmesi ile bilimsel metodlardan faydalanarak mevcut duruma ait değerlendirmeler yapılmalı, trafik problemleri doğru tespit edilmeli ve çözüme yönelik en doğru projenin seçimi gerçekleştirilmelidir.

Çalışma kapsamında kent içi ulaşım kavramı ve projelendirme aşamalarında trafik mühendisliği ve tasarımsal anlamda dikkat edilmesi gereken hususlar anlatılmış olup, mikrosimülasyon yöntemi detaylandırılarak uygulama örneği ile birlikte ulaşımında modellemenin önemi vurgulanmıştır.

Gelişen simülasyon teknolojileri sayesinde ulaşım sistemin mevcut durumu simülasyon ortamına yansıtılarak, sisteme uyacak kavşak çözümleri ve yol ağları hızlı ve kapsamlı bir şekilde üretilebilmektedir. Ayrıca simülasyon programları farklı senaryolarda yol üzerindeki sistemin nasıl davrandığını görmemize, gerekli gördüğümüz değişiklikleri hızlıca değiştirip tekrar gözlem yapabilmemize olanak sağlar.

Karayolu ulaşımının temeli olan kavşaklar bir ulaşım sistemi içinde trafik akımının en fazla kesintiye uğradığı noktalar olup, birçok bilimsel araştırmada ele alınmıştır. Kavşaktaki akım hareketlerinin detaylı olarak incelenebildiği mikrosimülasyon yöntemi bu çalışmanın yöntemi

olup, kent içi ulaşım sorunlarının bilimsel yöntemlerle analiz edildiği birçok çalışmanın da konusu olmuştur.

Oktan (2021) tarafından yapılan çalışmada, Erzurum ilinde bulunan şehrin önemli kavşakları olan İstasyon kavşağı, Gez kavşağı, İstanbulkapı kavşaklarının oluşturduğu koridor, simülasyon yöntemi kullanılarak modellenmiş ve kavşakların seyahat süresi, ortalama gecikmesi, karbon monoksit(CO) ve azot oksitler(NOx) olan sera gazları ile uçucu organik bileşik(VOC) hava kirleticilerinin emisyon salınımı, yakıt tüketimi ve kuyruk uzunluğu gibi parametrelerinin iyileştirilmesi için farklı senaryolar analiz edilmiştir.

Irgat (2019) tarafından yapılan çalışmada önemli trafik sorunlarından olan kazalar ele alınmış ve simülasyon yöntemi olarak Visum Safety kaza analizi programı ile kazalar ile trafik verilerini ilişkilendirerek analizler yapılmıştır. Trafik hacmi, trafik yoğunluğu, hızlar ve araç cinsleri gibi trafik parametrelerinin kazalar ile ilişkilendirilmesi kazaların yorumlanmasında ve önlemlerin alınmasında daha etkili olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

İncelemeler sonucunda görüldüğü üzere trafik simülasyon programları sayesinde kavşak veya kavşakların oluşturduğu koridorların mevcut veya tasarımlarının simülasyon modeli oluşturularak sistemde meydana gelen seyahat süreleri, durma sayıları ve gecikmeler gibi kavşak performansını belirleyen parametreler analiz edilebilmektedir.

Çalışmamızda proje tasarım süreci tamamlanmış olan bir koridora ait mevcut durum ve proje sonrası durum irdelenerek bu koridordaki kavşak tasarımlarının uygunluğu incelenmiş, proje tasarımının ne denli doğru olduğu sorgulanmıştır. Bu amaçla modeli oluşturan yol ağının çeşitli kriterlere göre performansları değerlendirilerek analiz sonuçları paylaşılmıştır. Uygulama alanı olarak yaşam kalitesini son derece olumsuz etkileyen ulaşım sorunlarının üst seviyede olduğu İstanbul ili Esenyurt ilçesi seçilmiştir.

Yöntemimizin mikrosimülasyon olması sebebi ile detay proje çalışılacağından il genelinde en yoğun nüfusa sahip olan Esenyurt ilçesi kapsamında kentsel hareketliliğin en fazla olduğu Ahmet Arif Caddesi ve etki alanındaki caddeler modellenmiştir. Caddeler üzerinde belirlenen kavşakların oluşturduğu koridorun analizi yapılarak mevcut trafik durumları tespit edilmiştir. Trafik sorunları tespit edilen koridor üzerinde imar durumuna göre önerilen kavşak geometrik düzenleme projesinin de modeli hazırlanarak kavşaklar için problem çözümleri değerlendirilmiştir. Böylece kavşaklarda hazırlanan projenin nasıl bir iyileştirme sağladığı performans değerleri alınarak belirlenmiştir.

2. KENT İÇİ ULAŞIM KAVRAMI

Ulaşım, insan, hayvan veya nesnelerin yer değişimi ile ilgili bir konudur. Yerleşik hayata geçilmesi ile birlikte ulaşımın önemi artmıştır.

Kent içi ulaşım ise kentte yaşayan nüfusun aktivitelerinden oluşmaktadır. Kent içi ulaşım eski dönemlerde yaya ve hayvan gücüne dayalı araçların hareketini kapsamakta iken, sonralarda çalışanların işyerlerine ve evlerine ulaşma ihtiyacının ortaya çıkması ile birlikte kent içi ulaşım türlerinin bugün ki haline gelmiştir. (Öncü, 1997)

Ülke nüfusunun artmasının yanı sıra, kırdaki yaşayan nüfusun azalması kent nüfusunun ise yüksek oranda artması birtakım sonuçları meydana getirmiştir. Ulaşım bakımından bu artışın sonucu; ekonomik faaliyetlerin artması ile birlikte kişi başı günlük yolculuk oranının yükselmiş olmasıdır. Bu durum tüm kent genelindeki toplam yolculuk sayısını da arttırmaktadır. Yolculuk sayılarında

artış ve yolculuk tiplerindeki farklılar sebebi ile ulaşım sektörünün kapsamı da genişlemektedir. Günümüzde kentsel mekânlardaki yolculuk sayıları ile birlikte yolculuk uzunlukları da artmakta ve yolculuk tipi ise motorlu araç yolculuğuna dönüşmektedir.

Kent içi ulaşım sistemleri, otobüsler, minibüsler, raylı sistemler, taksiler, taksi-dolmuşlar, servis araçları ve binek taşıtlardan oluşmaktadır. Kent büyüklüğüne bağlı olarak seyahat süresi ve ulaşım türü seçimi değişmektedir (Tiwari, 2006).

Kent içi ulaşımın kapsamında genel olarak karayolu, demiryolu ve denizyolu yer almaktadır.

Kent içi ulaşım türlerini karayolu, demiryolu ve denizyolu başlıkları altında sınıflandırmak mümkün olup, bu türler Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kent içi Ulaşım Türleri

3. PROJE TASARIM İLKELERİ

Tasarım anlamına gelen dizayn (design) sözcüğü Latince disignare sözcüğünden gelmekte olup, Rönesans’tan sonra ‘tasarım’ sözcüğü Fransızca dessiner, İtalyanca disegno’dan İngilizce’ye girmiştir. Sözcük, bugün çizim, eskiz ve aynı zamanda planlama ve tasarlama anlamlarına gelen şeyleri içermektedir (Barnard, 2002).

Tasarım; kentin dönüşümü ve yeniden kurgulanmasıdır. Ama tasarım, kenti var eden bütün detayların, mesela köprülerin, yolların, kaldırımların, park ve bahçelerin dizayn edilerek ortaya çıkma meselesidir (Gezgin, 2007).

Tüm alanlarda tasarım yapılmakta olup, her alanda tasarıma ait belli temel tasarım ilkeleri bulunmaktadır. Başarılı bir tasarım oluşması için konu özelinde tasarım ilkeleri belirlenerek, yaratıcılık ile birleştirilmeli ve uygulanmalıdır. Ulaşım projeleri içinde tasarım ilkeleri sorun tespiti ve çözüm yöntemlerine yönelik olarak belirlenmekte ve genelleşmektedir.

3.1. Kent İçi Ulaşım Tasarımı

Kent içi ulaşım, kentli nüfusun artarak devam eden yolcu ve mal hareketlerini içermektedir. Kentlerin yayılarak büyümeleri ve otomobil sahipliği yolculuk mesafelerinin ve taleplerinin artmasına sebep olmaktadır. Ulaşım sistemleri bu büyümeyle birlikte meydana gelen yolculuk taleplerine cevap veremediğinden, kentlerde ulaşım ve trafik problemleri ortaya çıkmaktadır. Kentli nüfus, zamanla artan motorlu araç kullanımından kötü yönde etkilenmiştir. Ulaşımında

yaşanan sorunlar, trafik sıkışıkları, trafikte oluşan zaman kayıpları, maliyetler ve bu sorunlara bağlı bedensel ve psikolojik etkiler kişilerin yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yolculuk mesafelerinin artması ile trafikte geçirilen sürede de artış ortaya çıkmaktadır. Bu durum maliyetleri de arttırmakta ve bu maliyetler tüm ülke ekonomisi için kayıplara yol açmaktadır.

Ortaya çıkan olumsuz sonuçlar en fazla, birden çok yolun kesiştiği noktalar olan kavşaklarda meydana gelmektedir. Yapılan araştırmalar sonucu kent içi ulaşım ağında meydana gelen gecikmelerin %70'den fazlasının kavşaklardaki zaman kayıplarından kaynaklandığı, kazaların da %40-60'ının kavşaklarda gerçekleştiği görülmektedir (Yayla 2004).

Kent içi ulaşım problemlerinin çözümü kentsel yaşam kalitesinin artırılması için çok önemli olup, sağlıklı ve kalıcı çözümlere ihtiyaç vardır. Bu çözümler kapsamında üretilen tüm ulaşım projelerinin en iyi hizmeti vermek amacıyla belli ilkelere dayandırılması gerekmektedir. Ulaşım sorunlarının en sık görüldüğü birimin kavşak noktaları olması sorunu temelde ele almamız gerektiğini ortaya koymakta olup bu çalışma kapsamında kavşak tasarım ilkeleri araştırılmıştır.

Mevcut durumda faaliyette olan kavşaklarda iyileştirme ve yeni yapılacak kavşakların sürdürülebilir faaliyet göstermesi için en iyi çözümü üretme amacı ile bazı ilkeler kavşakların temel tasarım ilkeleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunlar güvenlik, yeterli hizmet düzeyi, ekonomi ve çevreye duyarlılıktır (Camcı 2019).

Kavşakların düzenlenmesinde; trafik devamlılığının sağlanması, güvenliğin artırılması, hızın uygun seviyede tutulması, gecikmelerin azaltılması, yeterli hizmet seviyesinin sağlanması, kullanıcı işletme maliyetlerinin düşürülmesi amacı güdülmelidir.

Bu nedenle kavşak planlamasının güvenlik, konfor, kapasite faktörleri göz önünde bulundurularak belirlenen temel ilkeleri aşağıdaki şekildedir (Murat, Y.Şazi Kavşakların Planlaması Ders Notları).

- Sürücüyü şaşırtacak karışık düzenlemelere gidilmemelidir.
- Trafik akımlarındaki kesişme ihtimalleri en az seviyede tutulmalıdır.
- Kavşak yaklaşım kollarında güvenlik faktörüne dikkat edilmelidir.
- Kavşaktan geçen ana trafik akımı en az sapan akım olmalıdır.
- Kavşak geçiş hızlarında kontrol fiziki yapılar ile sağlanmalıdır.

4. PERFORMANS KRİTERLERİ

Performans, belirli amaçlara yönelik planlı etkinlikler sonucu nicel ya da nitel olarak değer kazanmış bir kavramdır (Eraslan ve Algün, 2005).

Projelerde performans ölçümü ile konu özelinde belirli kriterlere bağlı olarak projenin hedefleri doğrultusunda işleyiş seviyesi ve ne kadar başarılı ilerleme olduğu ortaya koyulmaktadır.

Kavşak performanslarında çeşitli kriterler değerlendirmekte olup, bu kriterlerden öne çıkanlar, seyahat süresi, taşıt gecikmesi, kuyruk uzunluğu ve hız değerleridir.

Gecikme, kuyruk uzunluğu ve hız parametreleri seyahat süresine doğrudan etki eden parametrelerdir. Diğer taraftan literatür araştırmalarında emisyon salınımı ve yakıt tüketimi gibi trafiğin olumsuz çevresel etkilerinin değerlendirilebileceği parametreler de öne çıkmaktadır.

Seyahat süresi, bir taşıt için kavşak yada koridor boyunca başlangıç noktası ile bitiş noktası arasındaki mesafeyi aldığı süredir.

Gecikme, taşıtların, kavşaktaki diğer taşıtlar, kavşak geometrisi ve sinyalizasyon sistemleri nedeniyle, kavşakta kaybettiği zaman olarak tanımlanmaktadır. Gecikme parametresi, yavaşlama-durma ve hızlanma gecikmesi olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır (Çakıcı, 2020).

Kuyruk uzunluğu, kavşak yaklaşım kollarında yer alan taşıtların hareket etmeden durduğu durumlarda oluşturdukları mesafedir.

Kavşaklar için işleyiş seviyesini gösteren husus kavşağın yol hizmet düzeyidir. Yol hizmet düzeyleri (Level of Service, LOS) A ile F arasında bir ölçeklendirme ile belirlenir (Traffic Engineering Handbook; TEH, 2010). A hizmet düzeyi en iyi düzeydeki kullanım koşullarını temsil ederken, F hizmet düzeyi (LOS F) en kötü düzeydeki kullanım koşullarını temsil eder. Bu koşullar yolculuk süresi, manevra yapabilme kabiliyeti, gecikme değerleri ve sürücüler için sağlanan konforu içermektedir.

A düzey, trafik akımında, sürücüler yol koşullarından neredeyse hiç etkilenmezler, trafik akımı içinde hız bakımından hareket serbestliği vardır.

B düzey, A seviye gibi serbest akım hızında ya da çok yakın hızlarda yolculuğa imkan tanır; ancak sürüş esnasında diğer kullanıcıların varlığı hissedilmeye başlanır. Hızı belirleme özgürlüğü vardır ancak, yolda manevra yapma kabiliyeti A düzeyine göre azalmaktadır. A ve B düzeylerinde, meydana gelecek trafik kazası gibi faktörlerin trafik akımına etkisi çok azdır.

C düzey yolculuk serbest akım hızında ya da yakın hızda devam edilirken, şerit değiştirme gibi manevralar sınırlanır bu yüzden sürücüler tarafından şerit değiştirme manevraları oldukça dikkatli yapılmaktadır. C düzeyinde konfor genel olarak anlamlı bir düzeyde azalmaktadır. Trafik kazası gibi bir olay meydana geldiğinde, kuyruklar oluşmakta ve gecikmeler yaşanmaktadır.

D düzeyinde trafik sorunlarının karşımıza çıktığı görülmekte olup, hızlar, trafik yoğunluğuna bağlı olarak biraz düşmekte ve manevra yapma özgürlüğü sınırlandırılmıştır. Trafik kazaları gibi olaylar neticesinde yol üzerinde uzun kuyruklar oluşmaktadır.

E düzeyi trafik talebinin karşılanamadığı akımın neredeyse durma seviyesine yaklaştığı düzeyi ifade eder. Genel olarak, manevra hareketi yüksek oranda sınırlı ve sürücüler için konforsuz bir yolculuk, fiziksel ve psikolojik rahatsızlıklar meydana gelmektedir.

F düzeyi, trafik akımında aksaklık olduğu anlamına gelen hizmet düzeyini ifade eder. Taşıtların trafik hızı oldukça düşük hızlara iner ve genellikle de tamamen durma noktasına gelirler. Bu durma noktası F düzeyin en belirgin özelliğidir.

5. MİKROSİMÜLASYON YÖNTEMİ

5.1. Mikro-Simülasyon Kavramı

Ulaşım modellemede, İstanbul Ana Ulaşım Planı, İstanbul Geneli Toplu Taşıma Optimizasyonu Modeli, Talep Yönetimi Modelleri makro ölçek, geometrik düzenleme tasarımlarını kapsayan Ön Proje, Uygulama Projesi gibi detay içeren planlar mikro ölçek simülasyon kapsamlarına girmektedir.

Simülasyon, özde deneysel nitelikli matematiksel modelleştirme tekniği olarak, sistemin davranışını inceleme ve tanımlama, sistemdeki değişmelerin etkilerini belirleme ve böylece gelecekteki davranışları tahmin etme amacı taşıyan deneysel ve uygulamalı bir metodolojidir (Kavcar, 2004). Simülasyon; bir sistemin neden sonuç ilişkilerine bağlı olarak sistem davranışlarının izlenmesini sağlayan bir modelleme tekniğidir. Simülasyonun amacı taşıtların sistem içindeki davranışlarını elde ederek kıyaslamak ve görsel olarak da ortaya sunmaktır.

Mikro-simülasyon ise; otoyol veya kent içi ulaşım sistemlerinde; mevcut trafik ve öneri projelerin performansını değerlendirmek için, mikro zaman aralıklarıyla taşıt hareketlerinin modellenmesidir. Mikro-simülasyon da modelci, ulaşım plancısı tarafından belirlenen seyahat modelini işletir. Yolcu ve araçların hareketlerini, kesişimleri ile oluşan kavşakları modelleyerek, trafik dinamiklerine ait birçok bilgiyi elde edebilmektedir.

Mikrosimülasyon yazılımları ile;

- Kavşağın geometrik düzenlemesi
- Trafik hacim artışı, Ağır taşıt sayısı
- Parklanma
- Toplu taşıma güzergahı ve durak yerleri, Varsa toplu taşıma önceliği,
- Kavşak sinyalli ise sinyal süreleri,
- Arterin ortalama hızı,

gibi veriler kullanılarak kavşağın mevcut çalışma şekli ve yeni bir tasarımı varsa; bu tasarımın bugün ve gelecekteki durumunun tespiti ve gözlemi yapılır.

Simülasyon programları ile kazanılacak avantajları aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür.

- Karar vericilerin mevcut trafik durumunun yorumlanmasını sağlamak
- Trafik sorunlarının çözümü için farklı senaryoların modellenmesini sağlamak,
- Senaryoları uygulamadan önce proje seçimini yapacak kurum ve kişilere değerlendirme imkanı sunmak,
- En iyi işleyiş sonucunu sunan senaryonun tespit edilmesini sağlayarak seçim kolaylığını sağlamak,
- Kavşak iyileştirmesini artırmaya yönelik projeler için maliyetleri en aza indirebilmeyi sağlamak,
- Zaman tasarrufu.

Mikro-simülasyon analizi karar vericilerin en doğru proje alternatifini seçmesi için bir araçtır. Herhangi bir trafik düzenleme projesi için, geri dönüşü olmayan ya da çok büyük maliyetli olacak hataların sahada yapılmasını engellemektir. Mikro-simülasyonun kapsamında aşağıdaki konular yer almaktadır.

- Kavşak Geometrileri Karşılaştırılması
- Ağ Ve Hareket Modelleri
- Kapasite Analizi
- Sinyal Sistemleri
- Anayol / Otoyol Simülasyonu
- Ulaşım Geliştirme Planlaması
- Trafik Yönetimi
- Toplu Taşıma Simülasyonu
- Yaya Simülasyonu

5.2. Modelin Hazırlanması

Mikrosimülasyon, ile aldığımız sonuçları düşünecek olursak, zengin bilgi içeriğinin yanı sıra, fazlaca zaman ve detaylı kaynak gerektiren bir çalışmadır. Mikro-simulasyon 4 aşamadan oluşmaktadır. Modeli oluştururken veri toplama, simülasyon yazılımına aktarma, animasyonları oluşturma analiz ve değerlendirme aşamaları tamamlanmalıdır.


Bir mikro-simülasyon modeli uzman ve tecrübeli trafik mühendisleri tarafından, yeterli zaman ve kaynak kullanımı ile uygun yazılım programları kullanılarak ve yerel duruma göre modelin kalibresi yapılarak hazırlanmalıdır.

5.2.1. Veri toplama

Proje aşamasında mevcut durumun analizine yönelik yapılması gereken en temel iş doğru ve yeterli veriyi temin etmek olmalıdır. Mevcut durum bilgilerinin derlenmesi ve değerlendirilmesi amacı ile arazi bilgileri, ulaşım sistemi verileri, trafik verileri, geometrik veriler gibi bilgilerin eksiksiz olarak temin edilmesi gerekmektedir.

Trafik verileri yollardaki taşıt miktarları, zirve saat değerleri, taşıt hızları, yaya hareketliliği, kavşaktaki kaza raporları gibi verilerdir.

Veri merkezli karar alabilmek, veriye dayalı problem çözebilmek, performans ölçebilmek gibi amaçlar doğrultusunda trafik mühendisliği çalışmalarında trafik sayımı yapılmaktadır. Şekil 2’de trafik akımlarındaki trafik verilerinin taşıt tiplerine ve akım yönlerine göre gösterildiği örnek bir sayım föyü yer almaktadır.

AKIM HAREKETLERİ				1. AKIM MODAL SPLİT - TÜREL DAĞILIM							
	SABAH	ÖĞLEN	AKŞAM	ZAMAN	OTOMOBİL	KAMYONET	TAKSİ	T. MİNÜBÜS	SERVİS MİN.	İ.E.T.T	AĞIR TAŞIT
1-2	2403	0	2476	SABAH	1171	294	193	77	632	6	30
1-3	0	0	0	ÖĞLEN	0	0	0	0	0	0	0
				AKŞAM	1515	349	164	50	353	4	41
				TOPLAN	2686	643	357	127	985	10	71
2-1	0	0	0	2. AKIM MODAL SPLİT - TÜREL DAĞILIM							
2-3	0	0	0	ZAMAN	OTOMOBİL	KAMYONET	TAKSİ	T. MİNÜBÜS	SERVİS MİN.	İ.E.T.T	AĞIR TAŞIT
				SABAH	0	0	0	0	0	0	0
				ÖĞLEN	0	0	0	0	0	0	0
				AKŞAM	0	0	0	0	0	0	0
				TOPLAN	0	0	0	0	0	0	0
U-1	0	0	0	3. AKIM MODAL SPLİT - TÜREL DAĞILIM							
U-2	0	0	0	ZAMAN	OTOMOBİL	KAMYONET	TAKSİ	T. MİNÜBÜS	SERVİS MİN.	İ.E.T.T	AĞIR TAŞIT
U-3	0	0	0	SABAH	2555	463	463	145	1132	26	63
				ÖĞLEN	0	0	0	0	0	0	0
				AKŞAM	3098	701	604	131	791	25	44
				TOPLAN	5653	1164	1067	276	1923	51	107
KAVŞAK BİLGİLERİ				ÖZET TABLOYA AİT KAVŞAK							
İLÇE:	ESEN YURT										
GRUP:	0										
KAV. NO:	0										
KAV. ADI:	ESEN YURT - 38055										
TARİH:	21.01.2020										

Şekil 2. Sayım Föyü Örneği, (İSBAK, 2020)

Veri toplama aşamasında elde edilen verilerle simülasyon kalibre edilmelidir.

5.2.2. Model kalibrasyonu

Modellemeye teşkil edecek verilerin toplanmasından sonra modelleme, simülasyon hazırlama ve kalibrasyon aşamasına geçilmektedir. Bu aşamada mikro-simülasyon yazılım programları kullanılmaktadır. Birçok simülasyon yazılımı mevcut olup, yaygın olarak kullanılan VISSIM programı çalışmamızda kullanılan mikrosimülasyon yazılımıdır.

VISSIM, R. Wiedemann (1974) tarafından geliştirilmiş, sürücülerin fiziksel ve psikolojik davranışlarını kullanan simülasyon yazılımıdır. VISSIM, her bir sürücüye ait sürücü davranışları araçlarının teknik kapasitelerine bağlı olarak modellenir. Sürücüler için davranış modelleri, seçilen hız ile mesafeye cevabın sınıflandırılması ile oluşturulur. Sürücüler, gereksinimler doğrultusunda veya daha hızlı ilerlemek amacıyla şerit değiştirmeye karar verirler. VISSIM’de dört sürüş modeli belirlenmiştir; serbest sürüş, yaklaşma, takip etme, frene basma. Her bir modelde, sürücüler takip mesafelerine göre tepki verme veya önceden belirlenmiş hedef hıza ulaşmaya çalışma gibi farklı davranışlarda bulunurlar (Gomes vd., 2003; PTV, 2005).

Mikro modelde mevcut durumun anlaşılabilmesi için öncelikli olarak veriler toplanarak sisteme aktarılır. Ardından mevcut durum ile benzetim modelimizin aynı olması için model kalibrasyonu yapılır. Mevcut durum kalibrasyonu için birçok yöntemden faydalanılmaktadır. Bu yöntemlerden Geoffrey E. Havers istatistiği (GEH) ile benzetim modeli ile sahada gözlenen taşıt hacim değerleri kullanılarak GEH değeri hesaplanmaktadır (CRC, 2006).

$$GEH = \sqrt{(M - C)^2 / (0,5 * (M + C))}$$

M: Gözlemlenen değer

C: Simülasyondaki değer

Elde edilen GEH değeri 5’in altında bir değere sahip olması benzetim modelinin kalibre edildiği anlamına gelmektedir (Bayata ve Bayrak 2018).

Mikroskobik simülasyon modellerini kalibre etmek için GEH analizi ile birlikte, taşıt takip ve şerit değiştirme teorileri ulaşım iyileştirmelerinin doğru değerlendirilmesinde etkilidir.

Taşıt takibi, sürücülerin takip mesafelerindeki kararlarını, güvenli boşlukları korumak için hız değişikliklerini kapsar.

Bir sürücü aşağıdakileri değerlendirerek başka bir aracı takip eder (Al- Hameedawi, 2017):

- Uzaklık
- Hız farkı
- Tepkime süresi
- Araç performansı

Şerit değiştirme, bir aracın bir şeritten bitişik şeride geçmesidir. Şerit değiştirme mikroskobik trafik simülasyonunda önemli bir bileşendir.

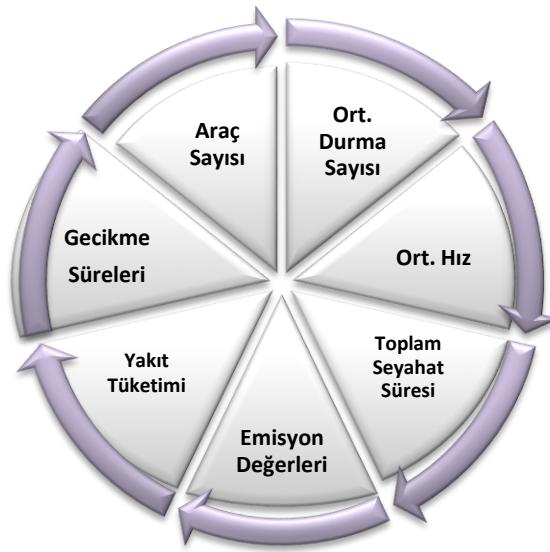
Benzetim modellerinin bir diğer önemli aşaması ise doğrulama (validation) aşamasıdır. Modelin doğrulanması oluşturulan model ile modellenen sistemin doğruluğunun araştırılmasıdır. Modelden elde edilen sonuçlar ile gerçek verilerin tutarlılığı incelenir.

5.2.3. Analiz ve değerlendirme

Mevcut durumun simülasyon ile irdelenmesi, yetersizliklerin ortaya konulmasını sağlarken, öneri projenin simülasyon üzerinde test edilmesi, öneri projedeki olumsuzlukların tespit edilip gerekli düzenlemelerin yeniden yapılmasını sağlamaktadır.

Simülasyonda test edilecek tüm alternatifler için; Ortalama Durma Sayısı (adet/taşıt), Ortalama Hız (km/saat), Ortalama Gecikme (sn), Sistemi Terk Eden Taşıt Sayısı (adet/saat), Seyahat Süresi (saat), CO* Emisyonu (kg), NOx* Emisyonu (kg), Yakıt Tüketimi (kg), Toplam Gecikmeler (saat) gibi performans kriterleri analiz edilerek raporlanıp, kıyaslanabilmektedir.

Modelleri hazırlanan kavşakların ya da ulaşım ağının performans analizini yapmak için Şekil 3'te gösterilen kriterler simülasyon yazılımlarının sonuç raporları üzerinden elde edilmektedir.



Şekil 3. Performans Kriterleri

İzlenen simülasyon modellerine göre;

- Koridor ve kavşaklardaki eksiklikler tespit edilerek, yeni geometrik düzenlemeler,
- Sinyal gereksinimleri,
- Öneri alternatiflerin kıyası kontrollü bir şekilde sürdürülebilmektedir.

Mevcut durum ve öneri durum simülasyon modelleri kalibrasyonu aşağıdaki kontrol kriterlerinden geçirilerek deneyimli personeller tarafından gerçekleştirilmelidir.

- Trafik Verilerinin Kontrolü
- Geometrik Verilerin Kontrolü
- Sinyalizasyon Verilerinin Kontrolü
- Hacim-Hız Kontrolü
- Model Parametrelerinin Kontrolü

5.2.4. 2 ve 3 boyutlu animasyonlar

Mevcut yolağı bilgilerinin, toplu taşıma verilerinin ve trafik sayım verilerinin mikro simülasyon programında modellenmesi ile proje görselleri proses çıktısı olarak elde edilmektedir. Bu modeller 2 ve 3 boyutlu olarak elde edilmekte olup, Şekil 4'de hazırlanmış örnek bir mikro-simülasyon görseli yer almaktadır.



Şekil 4. Mikro-simülasyon Görseli- Altgeçit Projesi, (İSBAK, 2020)

6. UYGULAMA ÖRNEĞİ: ESENYURT İLÇESİ AHMET ARİF CADDESİ

Günümüzde nüfus ve nüfus yoğunluğunun artmaya devam ettiği gözlenen kentlerde ulaşım ihtiyacı da giderek artmakta ve karmaşık hale gelmektedir (Yiğit ve Suri, 2020).

İstanbul ilinin 2021 ilçelere göre nüfus verileri incelendiğinde Esenyurt ilçesi en yüksek orana sahip olduğundan çalışma yapılan kavşaklar son yıllarda yüksek nüfus artışının ve yapılaşmanın meydana geldiği Esenyurt ilçesinden seçilmiştir. Esenyurt ilçesinin nüfus artış hızı ve yoğunluğu incelenmiş ve İstanbul il genelindeki ortalamalardan yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Tablo 1’de İstanbul ve Esenyurt için nüfus bilgileri verilmiştir.

Tablo 1. Nüfus ve Yüzölçümü Verileri, TÜİK

	Nüfus Bilgileri		Yüz Ölçümü
	2011	2021	(Km2)
İstanbul	13.624.240	15.840.900	5313,0
Esenyurt	500.027	977.489	42,9

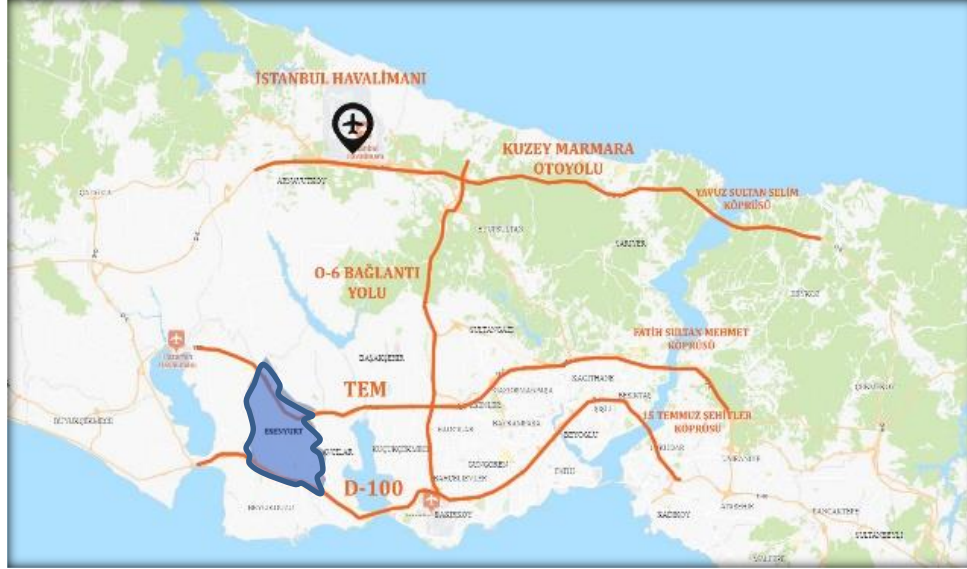
Esenyurt ilçesindeki sanayi aktivitelerinin yüksek oranda olması nüfusun gelişimini ve dağılımını etkileyen en önemli faktördür. İlçede İstanbul Sanayi Odasının verilerine göre 990 adet fabrika, atölye ve üretim tesisi faaliyet göstermektedir (Ayhan, 2019). Esenyurt sahip olduğu sanayi tesisi bakımından İstanbul’daki ilçeler içerisinde Başakşehir’den sonra 2. ilçe konumundadır (Ayhan, 2019).

Tüm bu gelişmelerin beraberinde ticari ve sosyal hareketliliğin yoğun olması neticesinde araç hareketliliğinin de üst seviyelerde olması kaçınılmazdır. Bu doğrultuda trafik yönünden gözlem yapılarak ilçe merkezindeki araç hareketliliğinin yoğun olduğu arterlerden olan Ahmet Arif Caddesi, 19 Mayıs Bulvarı, Nazım Hikmet Bulvarı, Gazi Caddesi ve Cumhuriyet Caddesi ile bağlantılı olan cadde ve sokakların oluşturduğu yol ağı çalışmaya dahil edilmiştir. Çalışma kapsamında simülasyon yöntemi ile kavşakların analizi bu bölümde anlatılmakta olup, simülasyon modeli öncesinde alanla ilgili detaylı bilgiler 6.1 başlık numaralı “Çalışma Alanındaki Mevcut Durum Bilgileri” bölümünde derlenmiştir.

6.1. Çalışma Alanındaki Mevcut Durum Bilgileri

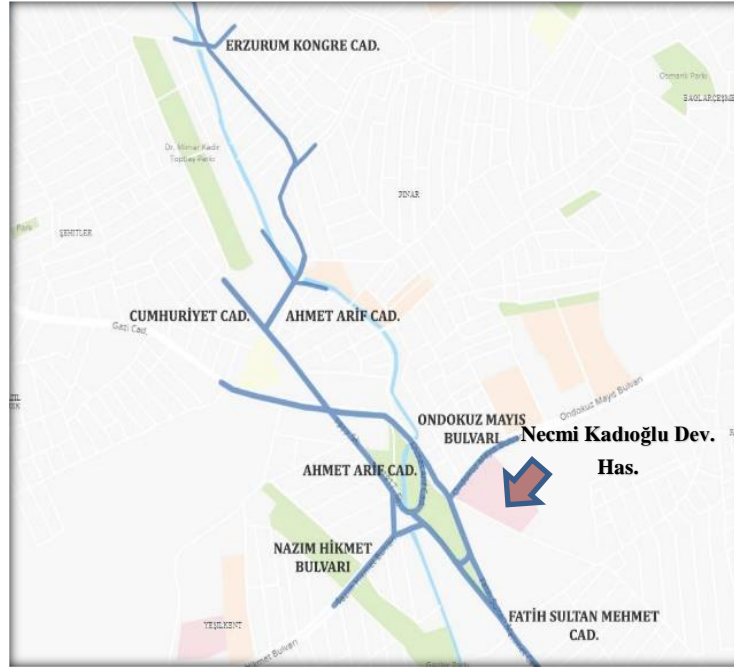
6.1.1. Konum bilgileri

İstanbul ilinin Avrupa yakasında güneybatı kesiminde bulunan Esenyurt ilçesinin güneyinde Beylikdüzü ilçesi, doğusunda Büyükçekmece, kuzeyinde Başakşehir ve doğusunda Avcılar ilçeleri bulunmaktadır. Şekil 5'te Esenyurt ilçesinin İstanbul üzerindeki konumu gösterilmiştir. Esenyurt ilçesi İstanbul Havalimanına kuş uçuşu yaklaşık 23 km, 15 Temmuz Şehitler Köprüsüne 30 km, Fatih Sultan Mehmet Köprüsüne 32 km mesafede yer almaktadır.



Şekil 5. Esenyurt İlçesinin Konumu

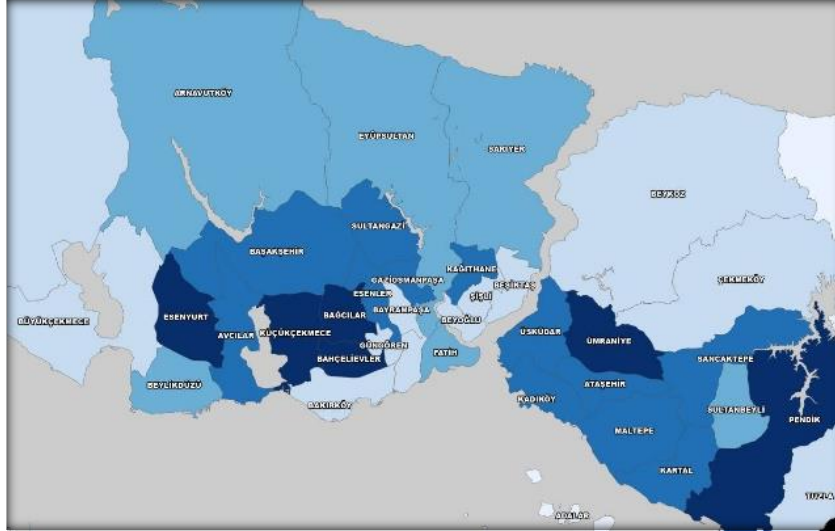
Çalışma alanının kapsamında bulunan arterler ise Yeşilkent Mahallesi sınırları içerisinde bulunmaktadır. Esenyurt ilçesi İstanbul'un en kalabalık ilçesi, Yeşilkent mahallesi ise ilçenin merkezi olarak değerlendirilebilecek konumda ve işlevde olduğundan yüksek nüfusa sahiptir. Çalışma alanı güzergahında Esenyurt Necmi Kadioğlu Devlet Hastanesi gibi önemli kamusal alan ile ağırlıklı olarak özel tıp merkezleri, düğün salonları, ticari fonksiyonu olan çeşitli dükkân ve işyerleri bulunmaktadır. Şekil 6'da yer alan haritada çalışma alanı kapsamındaki yol güzergahı ve cazibe merkezi olan Esenyurt Necmi Kadioğlu Devlet Hastanesi gösterilmiştir.



Şekil 6. Çalışma Alanı Kapsamındaki Yol Güzergâhı

6.1.2. Nüfus verileri

İstanbul ilinin 2021 ilçelere göre nüfus verileri incelendiğinde Esenyurt ilçesi en yüksek, Adalar ilçesi ise en düşük değerlere sahiptir. Şekil 7'de yer alan haritada İstanbul'daki ilçelerin nüfus büyüklükleri renk bazında sınıflandırılarak açıktan koyuya doğru nüfus artışları gösterilmiştir. Haritadan da algılanacağı gibi yoğun nüfusa sahip Esenyurt ilçesi koyu mavi renk ile gösterilmiştir.



Şekil 7. İstanbul İli İlçelere Göre Nüfus Gösterimi, İBB Cbs Veri Sistemi

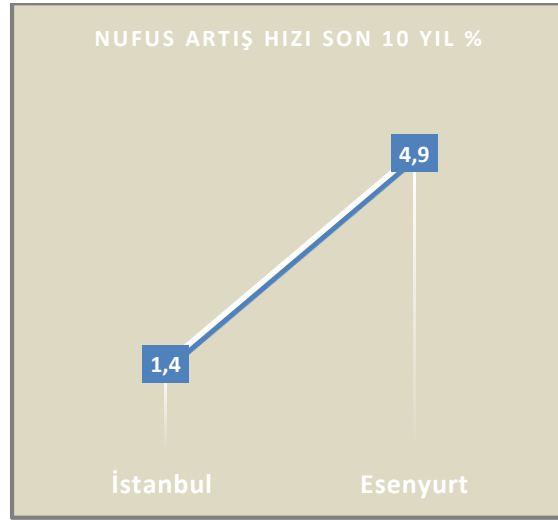
TÜİK rakamlarına göre İstanbul'un nüfusu 2021 yılında 15 milyon 840 bin 900 kişi, İstanbul'un en kalabalık ilçeleri sırasıyla; 977 bin 489 kişi ile Esenyurt, 805 bin 930 kişi ile Küçükçekmece ve 744 bin 351 kişi ile Bağcılar'dır.



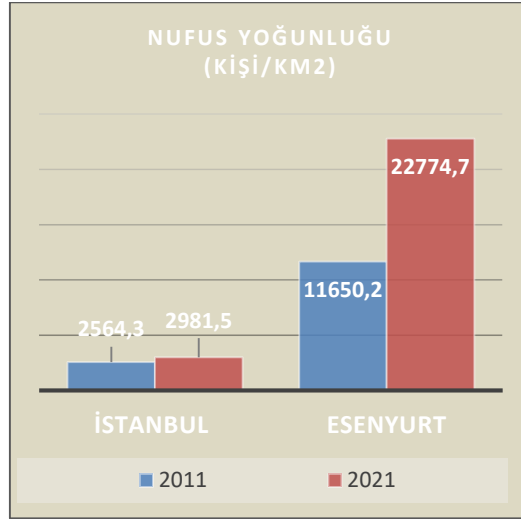
Şekil 8. Esenyurt İlçesi ve Yakın Çevresi Nüfus Verileri, İBB Cbs Veri Sistemi

Esenyurt ilçesine komşu ve yakın çevresinde olan ilçelerin yoğun nüfusa sahip olduğu bilgisi elde edilmiş olup Şekil 8’de yer alan haritada bu bilgi görsel olarak gösterilmiştir.

Esenyurt ilçesindeki nüfus bilgileri elde edilmiş olup, 2011 ve 2021 yılı nüfus artış hızı ve yoğunluğu incelenmiştir. Bu bilgilere göre Şekil 9’da da gösterildiği gibi İstanbul için son 10 yıldaki ortalama yıllık artış hızı %1,4 iken Esenyurtta bu değer 4,9’dur.



Şekil 9. Nüfus Artış Hızı (Son 10 Yıl Yıllık Ortalama), TÜİK



Şekil 10. Nüfus Yoğunluğu, TÜİK

Şekil 10’da gösterildiği gibi İstanbul için 2021 yılında nüfus yoğunluğu 2981,50 kişi/km² iken Esenyurtta bu değer 22774,70 kişi/km²’dir.

6.1.3. İmar durumu verileri

Esenyurt İlçesi plan çalışmaları 2013 yılında yapılmış olup, çalışma alanının kapsamında olan imar planı “İstanbul İli Esenyurt İlçesi Tem Güneyi 3. Etap 1/1000 Ölçekli Uygulama İmar Planı Değişikliği” planı olup, 12.07.2013 yılında onaylanmıştır.



Şekil 11. Çalışma Alanının İmar Durumu Görseli -1/1000 Uygulama İmar Planı, İBB Cbs Veri Sistemi

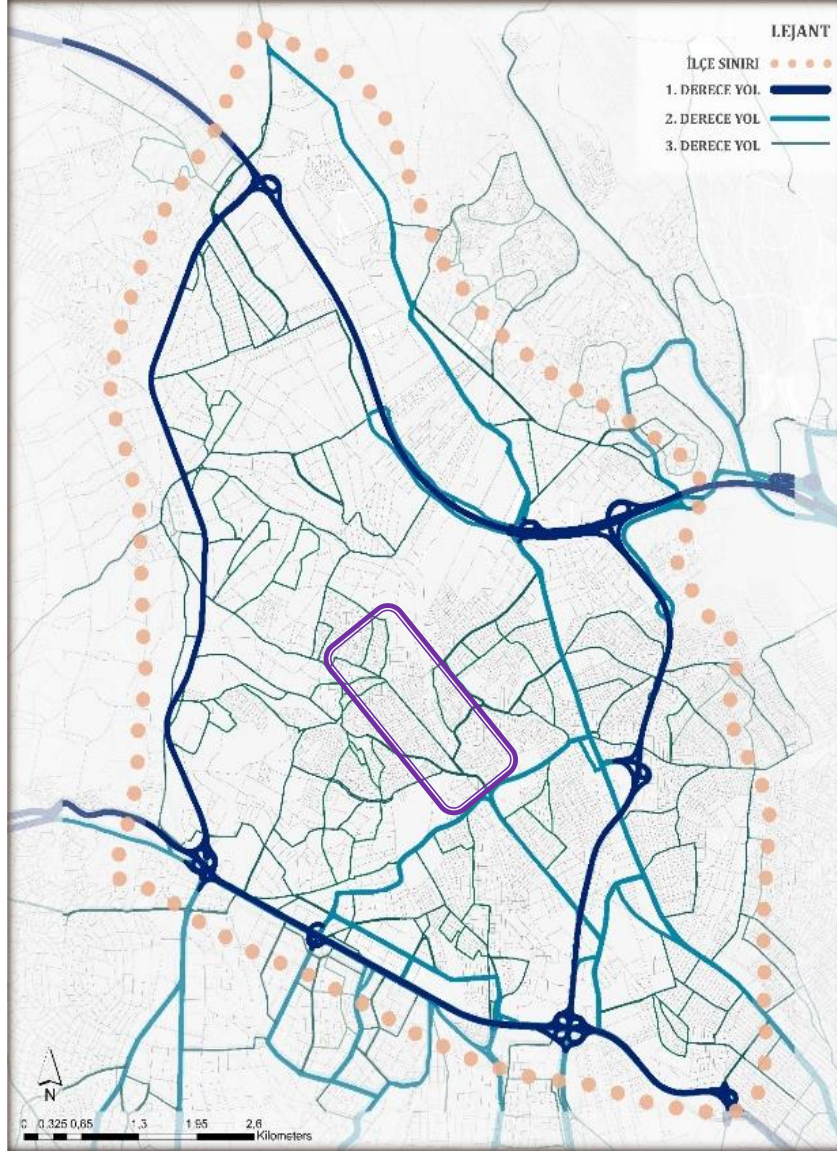
Şekil 11’de gösterilen plan koşullarına göre mevcut yol güzergahına dere boyunca koruma kuşağı ve yol güzergahı eklenmiş olup, proje tasarımlarında bu koşullar göz önünde bulundurulmuştur.

6.1.4. Ulaşım verileri

Esenyurt Kaymakamlığı verilerine göre Esenyurt yaklaşık olarak 4800 Hektar bir alanda yer almaktadır. İlçenin doğusunda Küçükçekmece ilçesi batısında TEM – D.100 Bağlantı yolu,

Büyüçekmece ilçesi, kuzeyinde Hoşdere-Kınalı-Trakya Otoyolu (E-6-TEM), güneyinde D-100 (E-5) Karayolu bulunmaktadır. E-5 karayolu ve TEM (E-6) otoyolunu bağlayan bağlantı yolu ilçeyi ikiye ayırmaktadır.

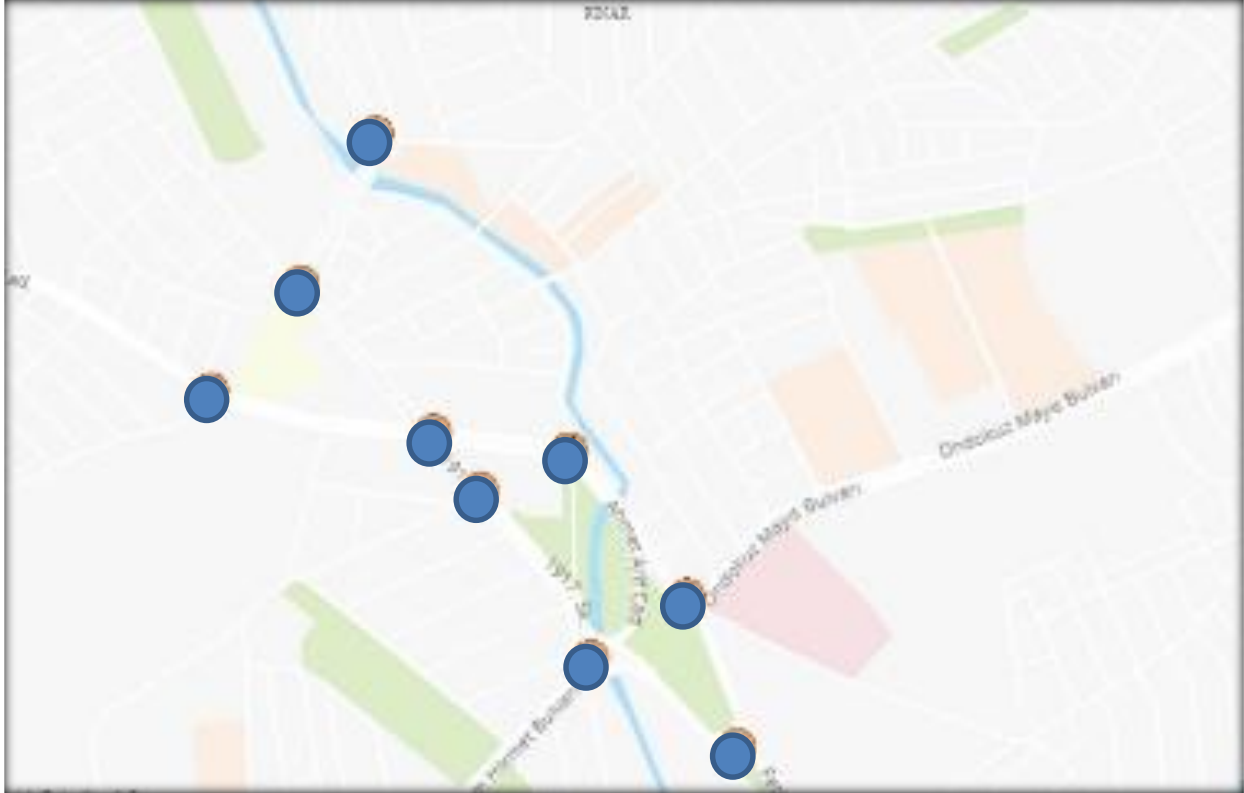
İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından hazırlanan Esenyurt ilçesi ulaşım kademelenmesi verilerine bakıldığında çalışma alanının kapsamında olan akslar 3. Derece yol kademesinde bulunmaktadır. Ana aksların ve yol kademelenmesinin bulunduğu harita Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Yol Kademelenmesi (1.2.3. Derece Yollar)

Çalışma alanı; Esenyurt Devlet Hastanesi Lokasyonu, Ondokuz Mayıs Bulvarı (2x2), Fatih Sultan Mehmet Caddesi (2x2), Ahmet Arif Caddesi (2x2), Erzurum Kongre Caddesi (2x2)’nde yer almaktadır.

Çalışma aksı boyunca 9 kavşak noktasında trafik sayım verileri İSBAK A.Ş’den temin edilerek bu veriler mevcut ve öneri durum modellerine aktarılmıştır. Sayım noktalarının konumları Şekil 13’te gösterilmiştir.



Şekil 13. Trafik Verisi Alınan Sayım Noktaları

6.1.5. Çalışma alanındaki ulaşım sorunları

Çalışma alanı Esenyurt ilçesi Fatih Mahallesinde konumlu Esenyurt Devlet Hastanesine açılan ana caddeleri kapsamaktadır. On Dokuz Mayıs Bulvarı ve Fatih Sultan Mehmet Caddesi kesişiminde oluşan kavşakla birlikte bölge trafiğini incelemek üzere Ahmet Arif Caddeleri ve Erzurum Kongre Caddesi bu proje kapsamında değerlendirilmiştir. Bölgede yer yer tek yön sirkülasyonu hakim olsa da yoğun araç talebi sebebiyle uzun kuyruklanmalar görülmektedir. Hastane bölgesinde toplu taşıma durakları mevcuttur. Bu noktalardaki disiplinsizlikler de bölge trafiği açısından sorun gündeme getirmektedir. Ayrıca sinyallerin verimsiz işlediği tespit edilmiştir.

Çalışma alanındaki trafik sorunlarını özetleyecek olursak;

- **Zirve Saatte Karşılaşılan Sorunlar**
 - Trafik Yoğunluğu
 - Sinyallerin verimsiz çalışması
 - Yaya Yoğunluğu
 - Kuyruklanma Sorunu
 - Toplu Taşıma Araçlarının Düzensiz Hareketi
- **Otopark Sorunları**
 - Düzensiz Parklanma
 - Yoğun Parklanma
- **Yaya Sorunları**
 - Araç Yolunda Hareket
 - Kontrolsüz Yaya Geçişleri

6.2. Mevcut Durumun Modellenmesi

Tasarımı yapılan proje alanındaki öngörü ana yüklenici kavşaklar olan, Şekil 14'deki haritada gösterilen 3 kavşağa ait geometrik düzenleme yapılarak geliştirilmiş olup, kavşakların kavşak tipleri değiştirilmiştir. Bu nedenle bu kavşaklara ait mevcut durum değerleri değerlendirilerek kalibrasyon çalışmaları yapılmıştır.

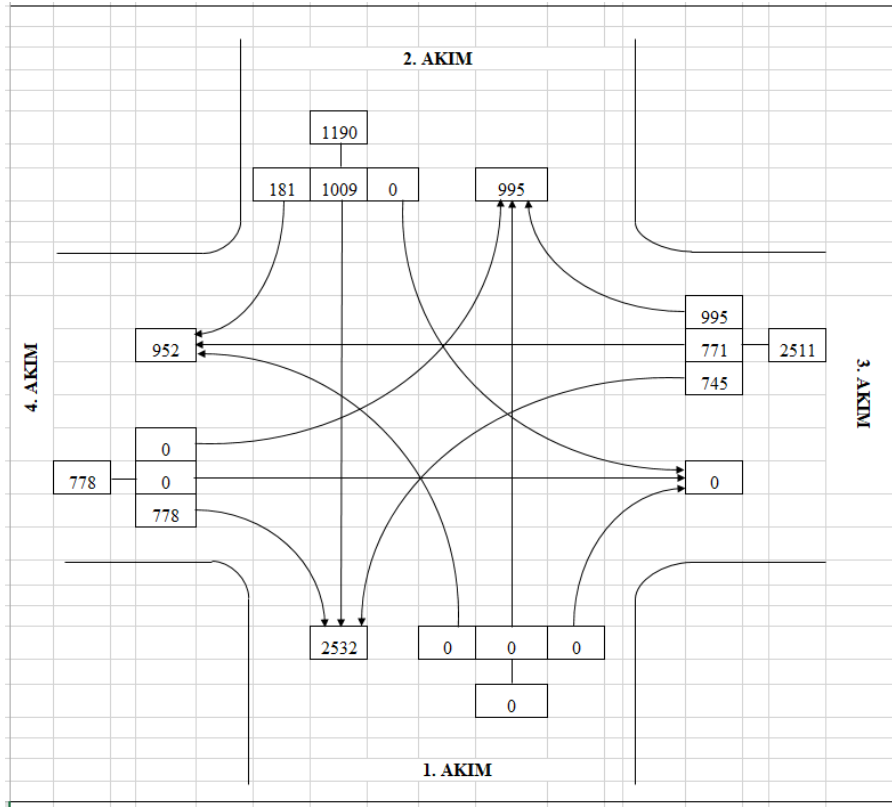
1 nolu kavşak Ahmet Arif Caddesi, Gazi Caddesi ve 1917 Sokak kesişiminde bulunan kontrollü bir kavşak olup, sinyalize olarak işletilmektedir. Bu kavşağa ait faz planları İSBAK A.Ş'den temin edilmiş olup, modele aktarılmıştır. 2 nolu kavşak Ahmet Arif Caddesi, Cumhuriyet Caddesi ve Tomruk Sokak kesişiminde bulunan kavşağın geometrisi dönel kavşak formundadır. 3 nolu kavşak Gazi Caddesi, Şehit Hüseyin Demiroğlu Sokak ve 2073. Cadde kesişiminde bulunan 4 kollu kontrolsüz kavşak formundadır.



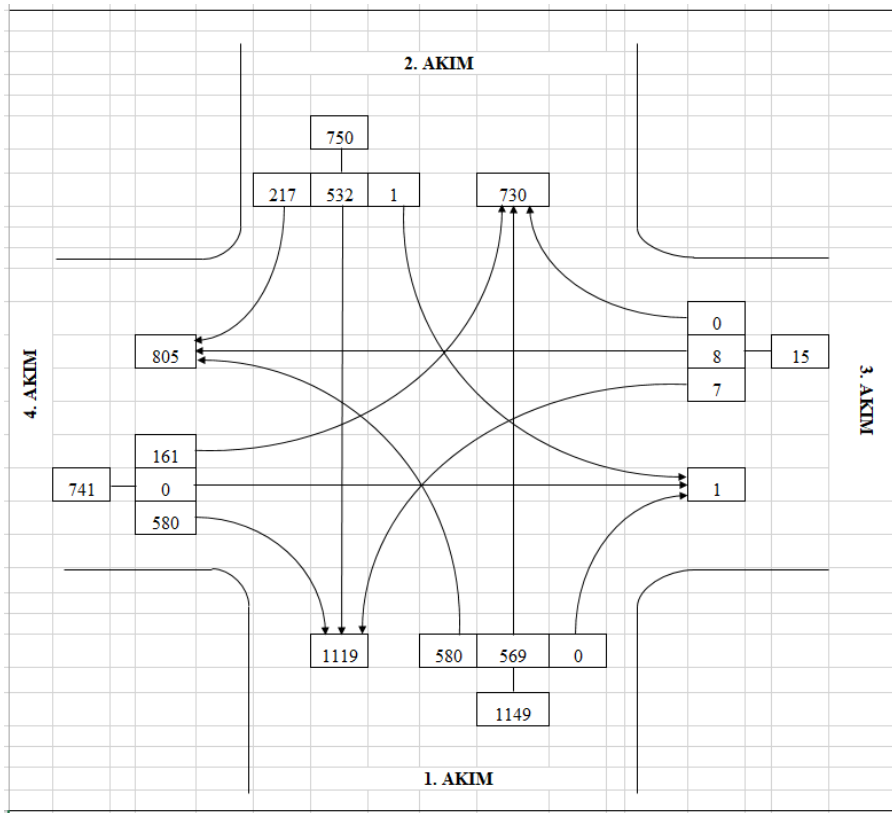
Şekil 14. Modeli Yapılan Ulaşım Ağında Yer Alan 3 Ana Kavşağın Konumu

Mikrosimülasyon yazılımına çalışma alanındaki kavşaklara ait bir takım veriler tanımlanmıştır. Bu veriler; saha gözlemleri, hâlihazır haritalar ve video görüntülerinden elde edilen kavşak yapısı, şerit disiplinleri gibi alanının yol özellikleridir. Bu veriler ile birlikte, kavşaktaki sürücü davranışları ve şerit kullanımları özellikle göz önünde bulundurulmuş ve kavşak sayımları, zirve saatlerdeki sinyal planları yazılıma tanımlanarak model oluşturulmuştur.

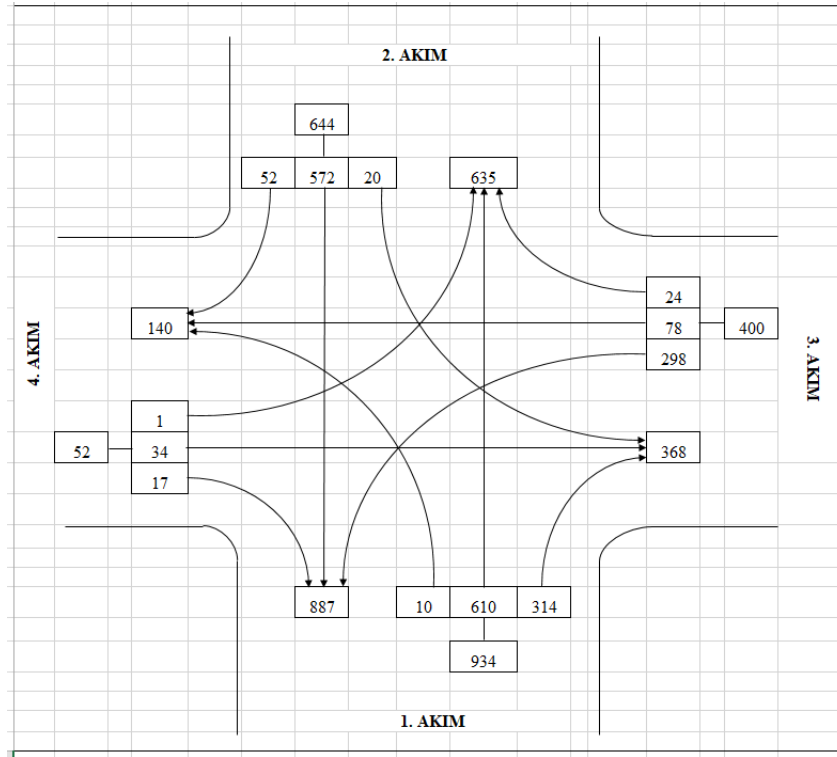
2020 yılına ait İSBAK A.Ş. tarafından elde edilen trafik sayımları model verisi olarak kullanılmış olup, bu sayımlarda tüm akım kollarındaki araç tiplerine göre dağılımları da modele aktarılmıştır. Çalışmanın kapsamında yer alan lokasyonda yoğun yaya geçişleri de bulunmakta olup, yaya sayımları temin edilememiştir. Ancak gerek saha gözlemlerinden gerekse bölgedeki yaya sinyalli kavşakların yaya yeşil sürelerinden elde edilen veriye göre yaya hareketleri modele dahil edilmiştir. Şekil 15, 16 ve 17'de sistem içerisinde öneri geometrisi değiştirilen kavşaklara ait sayım değerleri yer almaktadır. Bu veriler model kalibrasyonu için GEH değerlerinin tespit edilmesi için değerlendirilmiştir.



Şekil 15. 1 No'lu Kavşağa Ait Sayım Değerleri (taşıt/saat) (İSBAK, 2020)

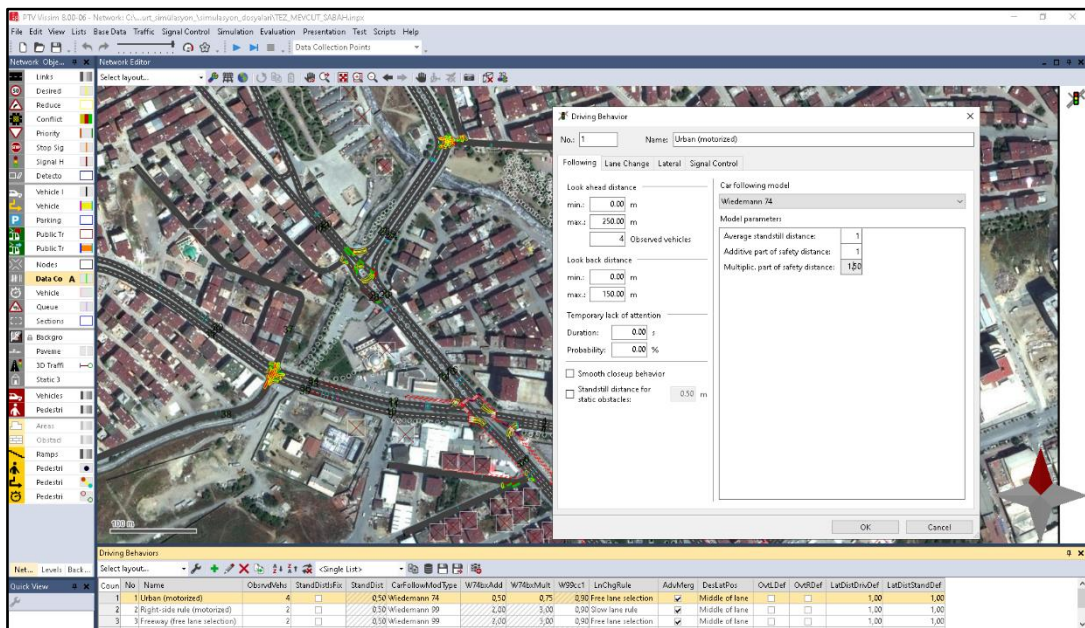


Şekil 16. 2 No'lu Kavşağa Ait Sayım Değerleri (taşıt/saat) (İSBAK, 2020)



Şekil 17. 3 No'lu Kavşağa Ait Sayım Değerleri (taşıt/saat) (İSBAK, 2020)

Ayrıca araç hızları trafik sayım videolarından ve saha deneyimlerine göre yaklaşık olarak tahmin edilerek modele girilmiştir. Taşıtlar için kabul edilen hızlar şehir içi hız olarak araç türlerine göre 40 ile 50 km/s arasında farklı değerler verilmiştir. Simülasyon modelinin veri girişlerinden sonraki adımı modelimizden emin olmak için yapılan kalibrasyon adımıdır. Model kalibrasyonu için iki ana parametre düzenlenerek gerekli kalibrasyonlar yapılarak GEH değerleri tespit edilmiştir (Tablo 2). Bu parametrelerden ilki takip mesafesi değeri ise şerit değiştirme parametreleridir (Şekil 18). Şehir içinde takip mesafesi 20m - 30m gibi değerler alabilirken, modelde bu değer İstanbul trafiği dikkate alınarak 5m olarak varsayılmıştır.



Şekil 18. Model kalibrasyonu için parametrelerin belirlendiği vissim arayüzü

Tablo 2 Hesaplanan GEH Değerleri

Kavşak Adı	Akım Kolları	Sayım Hacim (araç/saat)	Model Hacim (araç/saat)	Fark	GEH Değeri
1 Nolu Kavşak	1	2532	2344	188	3,818
	2	2385	2533	-148	2,985
	3	2511	2496	15	0,300
	4	1730	1818	-88	2,089
2 Nolu Kavşak	1	2268	2339	-71	1,479
	2	1480	1501	-21	0,531
	3	1546	1525	21	0,549
	4	16	13	3	0,788
3 Nolu Kavşak	1	1821	1820	1	0,035
	2	1134	1256	-122	3,515
	3	52	51	1	0,139
	4	400	390	10	0,503

GEH değerlerinin 5'in altında çıkması ile model kalibrasyonu tamamlanmış, olup parametre değerleri öneri durum içinde aynı alınmıştır. Kavşaklara ait benzetim modelleri, PTV VISSIM 8.0 trafik mikrosimülasyon yazılımı aracılığıyla oluşturulmuş olup, Şekil 19'da kavşaklardaki kuyruklanmaların gösterildiği model görseli yer almaktadır.



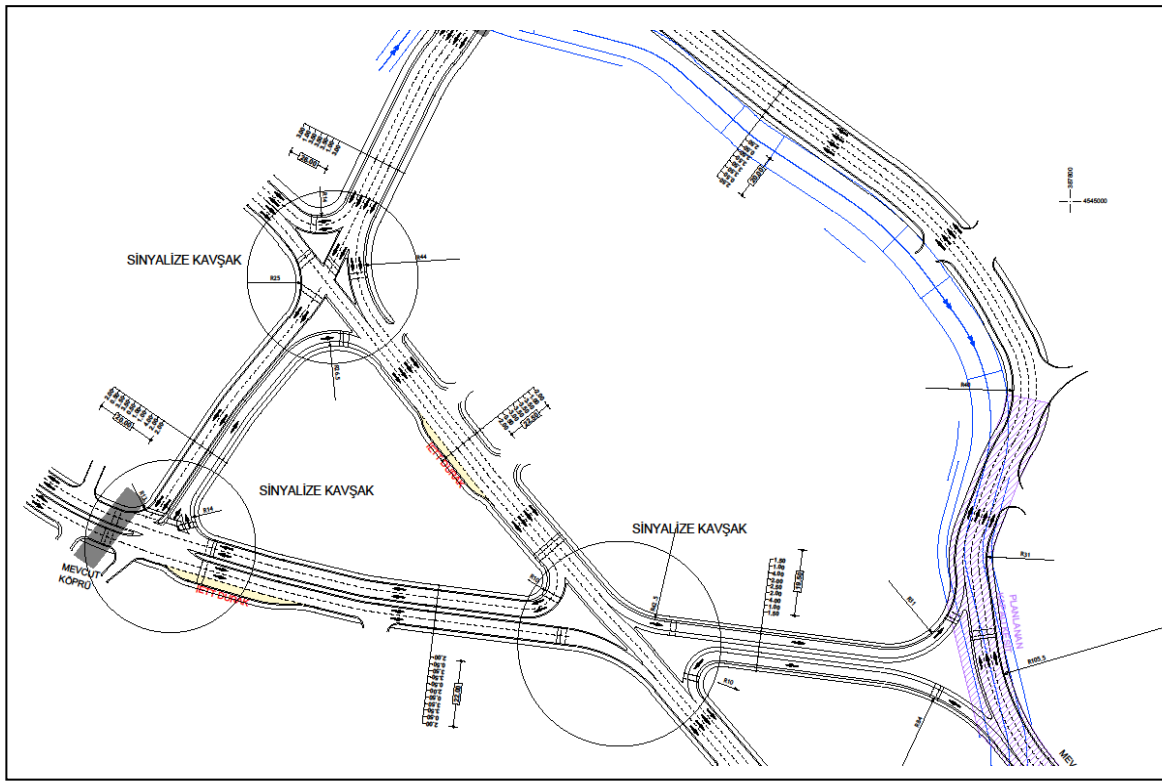
Şekil 19. Simülasyon Görüntüleri-Mevcut Kuyruklanmalar

6.3. Tasarlanmış Ulaşım Projesinin Modellenmesi

Çalışma alanının genel sorunlarına yönelik çözümler için bölgenin imar planları değerlendirilmiş ve planlanan yollarda projeye dahil edilerek olası sirkülasyon değerlendirilmiştir. Bu çalışmalar simülasyon yöntemi ile analiz edilmiştir.

Geliştirilen öneri proje çalışmasında Hastane önündeki kavşağın devam olan Ahmet Arif Caddesi ile Erzurum Kongre Caddesi arasında yeni bir yol planlanmıştır. Aynı şekilde Ahmet Arif Caddesi üzerinde 4*1 şerit disiplini tek yön yeni bir yol da tasarlanmıştır. Yeni açılan yollara bağlı olarak sirkülasyonlar değerlendirilmiş ve kavşak düzenlemeleri tamamlanmıştır.

1 nolu kavşak mevcut durumda 2*2 sinyalizasyonlu iken proje öngörüsünde araç sinyalleri kaldırılarak kesişimler azaltılmıştır. Kavşakta sadece yaya kullanımı için sinyal önerilmiştir. 2 nolu kavşak mevcut durumda dönel kavşak formunda olup, öneri durumunda araç kesişimlerine bağlı olarak 2 fazlı sinyalizasyonlu kavşak olarak planlanmıştır. 3 nolu kavşak mevcut durumda kontrolsüz kavşak formunda olup öneri durumunda sola dönüş talepleri de dikkate alınarak 3 fazlı sinyalizasyonlu kavşak olarak önerilmiştir. Önerilen projede 2 ile 3 nolu kavşak arasında yeni bir yol açılarak bu kavşaklar birbirine bağlanmıştır. Kavşaklara ait değişen geometrilerin gösterildiği öneri durum projesi Şekil 20’de gösterilmiştir. Şekil 21’de ise proje alanındaki tüm düzenlemelerin yer aldığı projenin mevcut konum haritasına çakıştırılmış hali yer almaktadır.



Şekil 20. Ahmet Arif Caddesi- Gazi Caddesi Kesişimi Proje Alanı, İBB



Şekil 21. Öneri Projenin Arazi Üzerinde Gösterimi

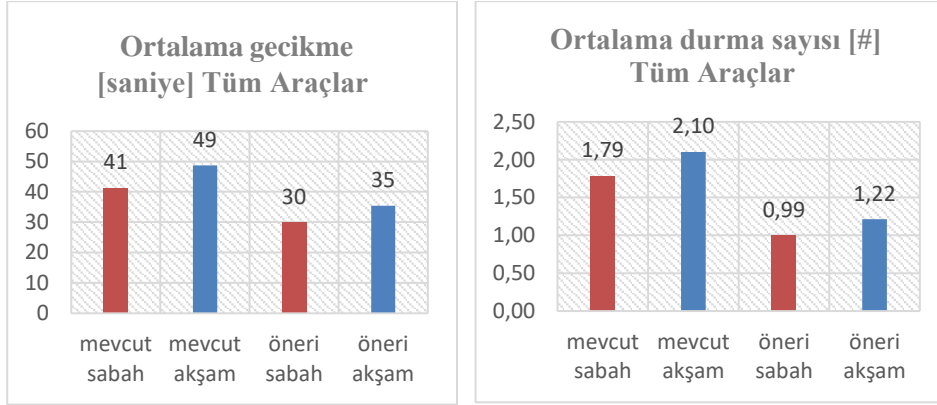


Şekil 22. Simülasyon Görüntüleri-Öneri

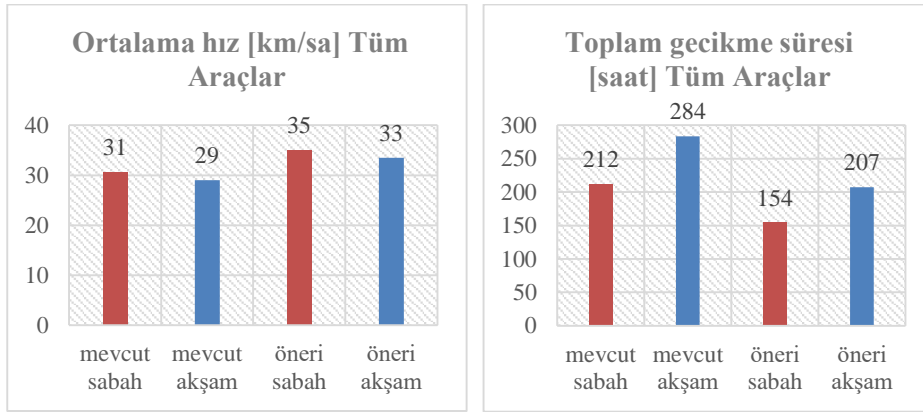
Şekil 22’de görüldüğü gibi mevcut durum modeline yansıyan kavşaklardaki kuyruklanmalar proje modelinde meydana gelmemektedir.

6.4. Mevcut Durum Ve Projenin Model Sonuçlarının Değerlendirmesi

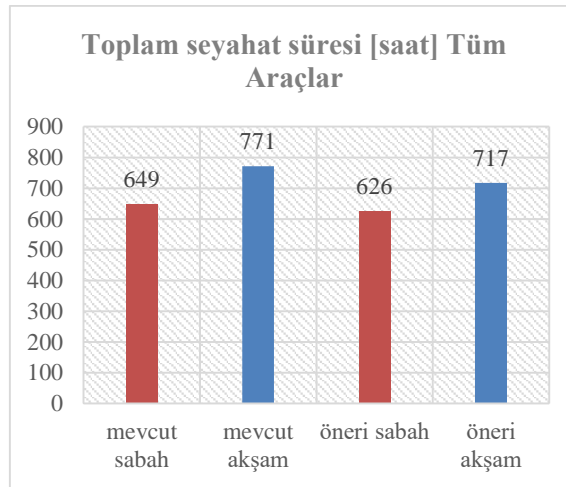
Şekil 23, 24 ve 25’de yer alan grafiklerde çalışma kapsamındaki güzergahın tüm yaklaşım kolları dahil oluşturulan ulaşım modeli için; mevcut ve öneri durumun sabah ve akşam değerlerinin performans ölçüm kriterlerine göre karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 23. Mevcut – Öneri Karşılaştırılması (Ortalama Gecikme ve Ortalama Durma Sayısı)



Şekil 24. Mevcut – Öneri Karşılaştırılması (Ortalama Hız ve Toplam Gecikme Süresi)



Şekil 25. Mevcut – Öneri Karşılaştırılması (Toplam Seyahat Süresi)

Yapılan analizlere bakıldığında öneri durum değerlerinin ortalama gecikme, ortalama durma, toplam gecikme ve toplam seyahat sürelerinde mevcut durum değerlerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Mevcut güzergahın değiştirilerek, sirkülasyon değişikliğinin yapılması ve ağ genelindeki kesişimlerin azaltılması sonuçlara olumlu yansımıştır. Kesişimlerin azaltıldığı noktalarda taleplerin karşılanması için yeni yollar açılarak kavşak noktaları tasarlanmış ve uygun geometrik düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemeler kavşaklarda bekleme sürelerini olumlu yönde etkilemiş olup, ağ genelinde trafiğin akıcılığı sağlanmıştır. Böylece mevcut durumdaki trafik sorunlarının giderilmesine yönelik çözümlerin, değiştirilen geometrik düzenlerin ne derece fayda ürettiği görülmüştür.

7. SONUÇ

Kentlerin karşı karşıya kaldığı problemlere karşı sürdürülebilir planlama anlayışına ihtiyaç duyulmaktadır. Ulaşım planlaması kentsel planlamanın ayrılmaz bir parçası olup, çalışmanın kapsamı ulaşım planlamasına yöneliktir.

Ulaşım planlama sürecinde doğru kararlar alınabilmesi için proje çalışmaları trafik mühendisliği yönünden ele alınmalı ve tasarımlar analiz edilerek değerlendirilmelidir.

Çalışmanın uygulama kısmında öneri modelimizin trafik mühendisliği etütlerine göre sabah ve akşam performans değerleri kıyaslanmıştır. Bu sonuçlara göre öneri modelimizin mevcut duruma göre yaklaşık olarak ortalama gecikme süresinde %27, ortalama durma sayısında %43, ortalama hız değerinde %15, toplam gecikme süresinde %10, toplam gecikme süresinde %27 ve toplam seyahat süresinde %5 daha iyi sonuçlar elde ettiği tespit edilmiştir. Böylece tasarımı yapılan projenin saha da uygulanması halinde trafik mühendisliği yönünden değerlendirilmesi sahaya uygulanmadan yapılarak elde edeceğimiz faydaları gözlemlenmiştir. Projenin uygulanabilirliği için karar vericilere projeyi değerlendirme imkânı sunulmuştur.

Modelleme yöntemi sayesinde projemizden elde edeceğimiz kazanımlar ortaya konularak ulaşım planlarına doğru öngörülebilir bulunmamız sağlanacak ve böylece ekonomik ve sosyal fayda elde etmemiz mümkün olacaktır.

Çalışmada ulaşımda modellemenin önemi vurgulanmıştır. Herhangi bir trafik düzenleme projesi için; dönüşü olmayan ya da çok büyük maliyetli olacak hataların sahada yapılmasını engellemek amaçlanmalıdır. Bu amaçla simülasyon yöntemi ile modelleme sayesinde akılcı ve kalıcı kararlar verilebilmesi için bilimsel metotlardan faydalanılmalıdır.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Al- Hameedawı, S. (2017). *Evaluation of travel time for different type of vehicles in traffic simulation* [Yüksek lisans tezi], Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ayhan, F., (2019). Esenyurt ilçesinde nüfusun gelişimi ve bu gelişimde rol oynayan etmenler. *Kent Akademisi*, 12(37), 67-81.
- Barnard, M. (2002), Sanat, tasarım ve görsel kültür (Çev. G. Korkmaz), *Ütopya Yayınları*, Ankara.
- Bayata, H.F. & Bayrak, O.Ü. (2018). Yeni yapılması planlanan bir kavşağın mikro-simülasyon ile değerlendirilmesi, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(3), 550-559.
- Camcı, A.A. (2019). *Kavşak tasarımında trafik simülasyon tekniklerinin kullanımı ve Sakarya için uygulamalar* [Yüksek lisans tezi], Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Columbia River Crossing (CRC) Project, (2006). Vissim Calibration and Validation, Technical Report. https://www.wsdot.wa.gov/accountability/ssb5806/docs/3_Context_Constraints/TrafficData/00156_2006_08_28.pdf adresinden 28 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- Çakıcı, Z. (2020). *Sinyalize kavşaklar için optimizasyon tabanlı trafik yönetim modeli* [Doktora Tezi] Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- Eraslan, E. & Algün, O. (2005). İdeal performans değerlendirme formu tasarımında analitik hiyerarşi yöntemi yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(1), 95-106.
- Esenyurt Kaymakamlığı, (2022). <http://www.esenyurt.gov.tr/> adresinden 28 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.
- Gezgin, T. (2007). Sanat-tasarım olgusunun zamansal izdüşümü ve 19. yüzyıl genel karakteri içinde sanat tasarım gerçekliği, *Anadolu Sanat*, 18, 37-51.
- Gomes, G., May, A. & Horowitz, R., (2003). A microsimulation of a congested freeway using VISSIM. *Ulaştırma Araştırma Kurulu, 82. Yıllık Toplantısı*, Washington.
- HCM, (2010). Highway capacity manual, 5th edition, *Transportation Research Board, TRB*, Washington, D.C. USD.
- Irgat, O. (2019). *Makroskobik ulaşım modelleme teknikleri kullanarak karayollarında trafik güvenliği analizleri* [Yüksek lisans tezi], Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- İBB, (2022). İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Koordinasyon Müdürlüğü, İstanbul.
- İsbak A.Ş. (2020). İsbak İstanbul Bilişim ve Akıllı Kent Teknolojileri A.Ş., İstanbul.
- Kavcar, B. (2004). *Simülasyon yöntemi kullanılarak yapılan satış tahminleriyle satış bütçesi hazırlanması* [Yüksek Lisans Tezi], Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Murat, Y.Ş. (2012). Kavşakların Planlaması Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi, <https://docplayer.biz.tr/19225541-Kavsakların-planlanması.html> adresinden 26 Haziran 2022 tarihinde alınmıştır.

- Oktan, H. (2021). *Erzurum'da üç kavşaktan oluşan koridorun mikrosimülasyon ve AHP yöntemiyle incelenmesi* [Yüksek lisans tezi], Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Erzurum.
- Öncü, E. (1997). Kent içi ulaşımında 21. yüzyıl perspektifi. *Ulaşım-Trafik Kongresi*, Ankara, 21-42.
- TEH, (2010). Traffic engineering handbook(6 th Edition). *Institute of Transportation Engineers*, Washington D.C. USA.
- Tiwari, G. (2006). Urban Passenger Transport: Framework for an Optimal Modal Mix, INRM Policy Brief Series, No: 1, *Asian Development Bank*, New Delhi.
- Yayla, N. (2004). Karayolu Mühendisliği, *Birsen Yayınevi*, İstanbul. 211-223.
- Yiğit, S. & Suri, L. (2020). Kent içi ulaşımında aktarma merkezlerinin rolü ve Yenibosna aktarma merkezi projesi, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(37), 11-21.



Araştırma Makalesi / Research Article

**CO₂ AKIŞKANININ KAYNAMALI AKIŞ REJİMİNDE ISI TRANSFERİ
KATSAYISININ ÇOKLU REGRESYON YÖNTEMİ İLE
TAHMİNLENMESİ***

**PREDICTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF CO₂ IN FLOW BOILING REGIME
USING MULTIPLE REGRESSION METHOD**

Ahmet KORKMAZ¹

Semih ÖZEL²

Mehmed Rafet ÖZDEMİR³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1230594>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
mehmet.ozdemir@marmara.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
06.01.2023

Kabul Tarihi / Accepted
24.04.2023

Öz

Teknolojinin gelişmesi ile performansı artan ve boyutu küçülen elektronik cihazların yaydıkları ısı artmış olup ihtiyaç duyulan soğutma yükü çok yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu soğutma yükünü karşılayabilmek için kullanılan geleneksel soğutucu akışkanların performansları, iyi olmasına rağmen küresel ısınma katsayıları ve ozon tabakası hasar potansiyel katsayıları yüksektir. Çeşitli uluslararası protokoller ve antlaşmalarla, bu geleneksel soğutucu akışkanların kullanımlarında küresel çapta kısıtlamaya gidilmiştir. Bu nedenle, araştırmacılar alternatif, çevre dostu soğutucu akışkanlar üzerine çalışmalar yapmaya başlamıştır. CO₂ akışkanı zehirli olmaması, küresel ısınma katsayısının 1 olması, ozon tabakası hasar potansiyel katsayısının 0 olması ve kaynamalı akış rejiminde yüksek performans sergilemesi sebebiyle, geleneksel akışkanlara rakip olarak öne çıkmaktadır. Fakat CO₂'nin diğer akışkanlardan farklı termo-fiziksel özelliklere sahip olması sebebiyle, literatürde CO₂ için kaynamalı akış rejiminde ısı transfer katsayısını yüksek doğruluk oranında veren bir korelasyona rastlanmamıştır. Bu çalışmada, farklı çap borularda, kaynamalı akış rejiminde bulunan CO₂ akışkanı ile yapılmış çalışmalardan alınan 1084 satır veri ile çoklu regresyon modeli ile ısı transfer katsayısı tahmini yapılmıştır. Bu amaçla 26 değişken analiz edilmiş ve aralarındaki korelasyon incelenmiştir. Sonuçlar literatüre dayalı olarak tartışılarak öneriler kısmında sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: CO₂, çoklu regresyon, ısı transferi, kaynamalı akış, tahmin.

Abstract

With the development of technology, the performance of electric devices has increased, and their sizes have been miniaturized. Therefore, the heat emitted by these devices has elevated, and this increased required cooling load rates. Although the cooling performance of conventional refrigerants could meet these cooling load rates, their global warming potential and ozone layer depletion coefficients are high. Accordingly, international protocols and agreements have started to restrict these traditional refrigerants globally. Therefore, researchers have begun to work on alternative, environmentally friendly refrigerants. At this point, CO₂ refrigerant stands out as a competitor to conventional refrigerants due to its non-toxic feature, low global warming potential value (1), zero ozone layer depletion coefficient, and high performance in the flow boiling regime. However, there is no high-accuracy flow boiling heat transfer coefficient in the literature due to the unique thermophysical properties of CO₂. In the current study, 1084 flow boiling heat transfer coefficient data of CO₂ for pipes having different diameters were taken from the literature studies. The collected flow boiling heat transfer coefficient data were tried to be predicted with the multiple regression model. For this purpose, 26 variables were analyzed and the correlation between them was examined. The results were discussed based on the literature, and suggestions were presented.

Keywords: CO₂, flow boiling, forecasting, heat transfer, multiple regression.

*Bu yayın Ahmet KORKMAZ isimli öğrencinin Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği (İngilizce) Programındaki Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir.

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
ahmet.korkmaz@habas.com.tr, Orcid.org/0000-0002-8930-9316.

²Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
semih.ozel@marmara.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-8281-2704.

³Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.
mehmet.ozdemir@marmara.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-3832-9659.

1.GİRİŞ

Küresel boyutta teknolojinin gelişmesiyle daha hızlı, daha kompakt ve daha güçlü cihazlar endüstriden ev aletlerine kadar hayatımızda yerini almıştır. Bu yüksek performansa sahip fakat kompakt cihazların birim alana düşen ısı akıları çok daha yüksek mertebelere ulaşmıştır (Al-Zaidi ve ark., 2022, Özdemir, 2016). Bu cihazları soğutmak için geliştirilen sistemlerde kullanılan R-11, R-12, R-123 gibi geleneksel soğutucu akışkanlar (CFC ve HCFC bazlı soğutucu akışkanlar) performans olarak çok iyi sonuçlar vermektedir. Fakat bu gazların ozon tabakasına yüksek zararlı etki potansiyeli (ODP), küresel ısınma katsayıları (GWP) ve atmosferde uzun süre kalmalarından dolayı çeşitli uluslararası antlaşmalarla yasaklanmış ya da kullanımına kısıtlar getirilmiştir (Di Filippo ve ark., 2022). Bu sebeplerden, araştırmacılar düşük ODP ve GWP değerlerine sahip çevre dostu soğutucu akışkanların performanslarını çeşitli koşullar altında araştırılması çalışmalarına başlamışlardır. Literatürde karşılaşılan çeşitli araştırmalar sonucunda, CO2 gibi geçmişte tespit edilen ve halen üzerinde çalışılan gazlardan yararlanma fikri ortaya çıkmıştır. CO2'nin toksik olmamasının ve yüksek performansının yansira GWP değerinin 1 ve ODP değerinin 0 olması, bu gazı geleneksel soğutucu akışkanlarla yarışabilir hale getirmiştir (Bruno ve ark., 2019). Literatürde CO2 üzerine yapılan birçok çalışmanın sonucunda, kaynamalı akış durumunda nükleotit bölgesinde CO2'nin ısı transfer veriminin en yüksek olduğu belirlenmiştir (Jiang ve ark., 2017). Bu çalışmalar sonucunda CO2'nin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı verimli soğutma sistemi ürünlerini laboratuvar ölçeğinden prototip ve nihai ürün aşamasına taşımak için kaynamalı akış bölgesinde ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonları üzerine çalışmalar yapılmasının önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu konuya aşağıda özetlenmiş benzer çalışmalar yapılmış olsa da, gerek CO2'nin benzersiz termo-fiziksel özelliklerinden ötürü gerek verilerin alındığı geometrilerin farklılığından dolayı yüksek doğruluğa sahip ısı transfer katsayısı korelasyonu önerilememiştir. Diğer bir sebep ise, kaynamalı akış bölgesinde kabarcıklı akış, dairesel akış, dalgalı akış gibi farklı akış rejimleri ortaya çıkmakta ve bu akış rejimlerinde sıvı-gaz dengesi farklı olmaktadır. Bahsedilen olgulardan ötürü farklı çalışmalardan elde edilen deneysel veriler, farklı ısı transfer katsayısı trendleri ortaya çıkarmıştır.

Bu kapsamda yapılan çalışmalara bakıldığında, Cheng ve ark. (2008) CO2'nin diğer geleneksel soğutucu akışkanlara nazaran düşük yüzey gerilmesi ve yüksek indirgenmiş basınç özelliklerinden ötürü kaynamalı akışta nükleotit bölgesinin baskın rejim olduğunu belirtmiştir. Bu durum, aynı doyma sıcaklığında dahi CO2'nin daha yüksek ısı transferi katsayısı değerlerine sahip olmasını ve dolayısıyla geleneksel soğutucu akışkanlar için geliştirilen ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonlarının CO2 için iyi çalışmamasına sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle Cheng ve ark. (2008) akış rejim haritasına dayalı tüm akış rejimlerini kapsayan 0.6-10 mm arası boru çaplarında, 50-1500 kg/m²s kütle akısı aralıklarında, 1.8-46 kW/m² ısı akısı aralıklarında ve -28°C ile +25°C doyma sıcaklığı bölgesinde çalışan bir ısı transferi katsayısı korelasyonu önermişlerdir. Çalışmada önerilen korelasyon, literatürden aldıkları 1124 ısı transferi verisi ile karşılaştırmışlar ve verilerin % 71.4'ünü ± % 30 bandında tahmin edebilmişlerdir. Diğer bir çalışmada Oh & Son (2011) yatay 4.57 mm çaplı borularda CO2'nin kaynamalı akış rejiminde ısı transferi katsayısı ve basınç düşüşünü deneysel olarak incelemişlerdir. Yazarlar, verilerini geleneksel soğutucu akışkanlar için geliştirilmiş ısı transfer katsayısı korelasyonları ile karşılaştırmışlar ve çok büyük sapmalar olduğu görülmüştür. Bunun üzerine veriler Cheng ve ark. (2008) tarafından CO2 için geliştirilmiş ısı transferi korelasyonu ile karşılaştırılmış ve %12.64 – %14.68 aralığında sapmaları daha uygun bulmuşlardır. Öte yandan başka bir çalışmada, Fang ve ark. (2013a) farklı araştırma gruplarının CO2 için kaynamalı akış rejiminde yaptığı çalışmalardan 2956 ısı transferi katsayısı verisi toplamış ve literatürdeki 34 ısı transferi katsayısı korelasyonu ile karşılaştırmışlardır. Bu korelasyonlardan 9 tanesi CO2 için geliştirilmiş olmasına karşın, 25 tanesi diğer soğutucu akışkanlar için geliştirilmiştir. Sonuç olarak, Fang (2013b) tarafından CO2 için geliştirilen ısı transfer katsayısı korelasyonunun veri setini maksimum %15.5 sapmayla en iyi tahmini verdiği belirtilmiştir. Yukarıda bahsedilen diğer çalışmaların aksine Cheng ve ark. (2008)

tarafından geliştirilen ısı transfer katsayısı korelasyonunun veri setini %34.2 sapmayla tahmin edebildiği bulunmuştur. Bu çalışmadan çıkabilecek diğer bir önemli bulgu ise bazı korelasyonlar mikro boru çapları için daha iyi sonuç verirken bazı korelasyonlar makro boru çapları için daha iyi sonuç vermektedir. Çok yakın zamanda yapılan bir çalışmada, Parahovnik & Peles (2022) mikro kanallarda yüksek basınç şartları altında CO₂ için kaynamalı akış olgusunu inceledi. Yazarlar, birçok ısı transferi korelasyonunun deneysel verilerini tahmin edemediğini belirtirken, farklı kaynamalı akış rejimlerinde farklı korelasyonların makul sonuç verdiğini belirtmişlerdir. Yukarıdaki literatür çalışmalarından anlaşıldığı üzere CO₂ için kaynamalı akış prosesinde ısı transferi katsayısını tahmin edebilen tam oturmuş bir korelasyon bulunmamaktadır.

Mühendislik başta olmak üzere çeşitli disiplinlerde tahminleme yöntemleri kullanılmaktadır. Çoklu regresyon modeli bu yöntemlerden en çok kullanılanlardandır. Chen ve ark. (2016) toprak kaynaklı dikey bir ısı değiştirici tasarımı için dokuz tane farklı girdi içeren 3B nümerik bir model geliştirmiştir. Modeli çözerek, bu bağlamda çoklu regresyon yöntemi ile ısı akısını veren bir korelasyon elde ettiler. Geliştirilen korelasyon deneysel verileri başarılı bir şekilde tahmin ettiğini bildirmişlerdir. Li ve ark. (2020) plakalı ısı eşanjörleri için açık literatürde bulunan veriler kullanarak ısı transferi katsayısını çoklu regresyon metodu ile tahmin etmeye çalışmıştır. Geliştirdikleri korelasyon ile verilerin %74.3'ünü \pm %30 aralığında, %94.9'unu ise \pm %50 aralığında tahmin edebilmişlerdir. Başka bir çalışmada, Zhang ve ark. (2021) yedi farklı akışkan için yoğunlaşma ısı transferi katsayısını tahmin edebilmek için çoklu regresyon yöntemi ile korelasyon geliştirmişlerdir. Geliştirilen korelasyon deneysel yoğunlaşma ısı transferi katsayı verilerini %8.9 hata payı ile tahmin edebilmiştir.

Yukarıdaki özetlenen örneklerde olduğu gibi, ısı transferi uygulamalarında çoklu regresyon yöntemi yine önceki çalışmalar ışığında belirlenmiş değişkenler ve bunlara bağlı veriler kullanılarak başarı ile uygulanabildiği görülmüştür. Çoklu regresyon modeli kullanılarak yapılan tahminlerin yüksek performans gösterebilmesi için modelde yer alan bağımsız değişkenler arasında kuvvetli bir ilişkinin olmaması tercih edilir (Eygü & Kılınç, 2020). Diğer yapılan çalışmalara bakıldığında kullanılan girdi değişkenlerinin ve bunlara bağlı verilerin sınıflandırılması alternatif şekillerde kullanılmıştır. Diğer çalışmalarda kullanılan değişken sayısının daha az olduğu ve genelde temel değişkenlerin kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca çalışmalarda benzer çalışmalarda farklı sınıflandırmalara göre deneysel veriler analiz edilmiştir. Bu çalışmada, literatürden deneysel olarak elde edilmiş 1084 kaynamalı akış ısı transferi katsayısı verisi çoklu regresyon metodu kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla diğer çalışmalardan farklı olarak 26 girdi değişkene ait 1084 satır veri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmanın ilk kısmında konunun önemi ve konu ile ilgili literatür verilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında bahsedilen problemin çözümü için kullanılacak olan veri seti ile ilgili genel bilgiler ve uygulanacak yöntem sunulmuştur. Çalışmanın üçüncü kısmında kaynamalı akışta CO₂ için elde edilen ısı transfer katsayısı modeli sunulmuş ve tartışılmıştır. Son kısımda ise çalışma sayesinde elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Çalışmada kullanılan kaynamalı akış bölgesinde CO₂'nin ısı transfer katsayısına ait deneysel olarak elde edilmiş 1084 satır veri Tablo 1'de görülebilecek literatür kaynaklarından toplanmıştır. Alınan verilerde boru çapları 0.5 mm ile 11.20 mm, kütle akıları 40 kg/m²s ile 1500 kg/m²s, doyma sıcaklıkları 245 K ile 288 K ve ısı akıları 0.5 kW/m² ile 46 kW/m² aralıklarında değişmektedir. Ayrıca alınan veri noktalarında CO₂'nin termofiziksel özelliklerini ve buna bağlı olarak kullanılan çeşitli boyutsuz sayıları hesaplamak için Span&Wagner (1996), Scalabrin ve ark., (2006), Jianxin ve Yigang (2009), Yun,ve ark., (2005) ve Mistral (2022) kaynaklarından faydalanılmıştır.

CO₂'nin kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısı (HTC) bu çalışmanın konusudur. Boru içi kaynamalı akışta başta boru çapı, ısı akısı, kütle akısı, doyma sıcaklığı olmak üzere ısı transferi katsayısını etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu çalışmada çoklu regresyon modelinde kullanılan girdi verileri olarak Tablo 2'de gösterilen ve literatürde farklı akışkanların kaynamalı akış ısı transferi katsayısı için kullanılan değişkenler analiz edilmiştir. Tablo 2'den görüleceği gibi bu modelde ısı transferi katsayısını etkileyen doğrudan bağımsız değişkenlerin yanında bu bağımsız değişkenlere bağlı olabilen diğer değişkenlerle beraber toplamda 26 değişken dâhil edilmiştir.

Tablo 1. Literatürden Alınan Verilerin Sınıflandırılması ve Kaynakları

Boru iç çapı (mm)	Kütle Akısı (kg/m ² s)	Doyma Sıcaklığı (K)	Isı Akısı (kW/m ²)	Buhar kalitesi (-)	Kaynak
7-10.08	80-200	260-223	6-8	0-1	Bansal&Zhao, 2007
3.5-6.10	98-408.6	260-245	5-15	0-1	Park&Hrnjak, 2007
0.6-10	50-1500	245-248	1.8-46	0-1	Cheng ve ark., 2008
6	349	265.20	10.10	0-1	Mastrullo ve ark., 2010
0.5-3	50-600	273-288	5-40	0-1	Oh ve ark., 2011
6	200-350	279.9-287	10-20.2	0-1	Grauso ve ark., 2011
11.20	40-200	258	0.5-10	0-0.8	Kim & Hrnjak, 2012
1.42-4.57	400-800	273-288	7.5-40	0-1	Zhang ve ark., 2012
6.11-11.20	40-200	258-243	1-10	0-1	Dönmez, 2012
1.42-7.72	209-424	263-273	5-20	0-1	Cheng ve ark., 2021

Tablo 2. Girdi Değişkenleri

Girdi Değişkenleri			
Boru iç çapı (D _m)	Buhar kalitesi (x)	G (kütle akısı)	Q (ısı akısı)
Doyma sıcaklığı (T _s)	İndirgenmiş basınç (P _r)	Toplam basınç (P _{tot})	Sıvı viskozite (μ _L)
Buhar viskozite (μ _v)	Sıvı özgül ısı (cp _L)	Buhar özgül ısı (cp _v)	Buhar özkütle (ρ _v)
Sıvı ısı iletkenliği (k _L)	Sıvı özkütle (ρ _L)	Yüzey gerilimi (σ)	Bond sayısı (Bo)
Buhar ısı iletkenliği (k _v)	Buhar Pr sayısı (Pr _L)	Sıvı Weber sayısı (We)	Froude sayısı (Fr)
Martinelli sayısı (X _{tt})	Boşluk oranı (ε)	Buhar Re sayısı (Re _v)	Sıvı Pr sayısı (Pr _L)
Buhar Weber sayısı (We)	Islanan yüzey (A)		

Bu çalışmada, çoklu regresyon modeli kullanılarak literatür kaynaklarından taranarak belirlenmiş amaca uygun 26 bağımsız değişkenin birbirleri arasındaki ilişkinin belirlenmesi ve bağımlı değişkene olan etkilerinin bir hata ölçme metodu olarak ne derece olduğunun gösterilmesi amaçlanmıştır. Çoklu regresyon modeli kullanılarak toplanan veriler ile bağımlı değişkenin davranış biçiminin tahminlenmesi bağımsız değişkenlere bağlı olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Öncesinde bağımsız değişkenlerin arasında ki korelasyon belirlenerek bağımlı değişkene etkisi az olan bağımsız değişkenlerin analizden çıkarılarak sonuçların optimum şekilde elde edilmesi planlanmıştır. Bu analizi yaparken en küçük kareler yöntemi kullanılarak en uygun regresyon katsayıları elde edilir ve bağımlı değişken olan CO₂'nin kaynamalı rejimdeki ısı transfer katsayısı (HTC) için veriler içinde olmayan şartlardaki değerlerin tahmin edilmesi sağlanır (Arslan & Ertuğrul, 2022). Bahsedilen en uygun regresyon katsayıları en küçük kareler metodunda ortaya çıkan hataların karelerinin toplamının minimum olmasını sağlayan katsayılardır. Böylece, ortaya çıkan hatanın en düşük değere yaklaşabilmesi için verilerin yakınından geçecek en uygun eğri bulunabilir.

N sayıda bağımsız değişken barındıran çoklu regresyon modeli denklem (1)'de gösterilmiştir, (Kayakuş & Terzioğlu, 2021).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Denklem (1)'de Y bağımlı değişken, X_n bağımsız değişken, β_n regresyon katsayıları ve ε hata terimidir. Kurulan modelin bağımlı değişkeni doğru tahmin edebilme başarısı 0 ile 1 arasında değişen R^2 ifadesi ile belirlenir. R^2 değerinin 1'e yakın olması kurulan modeldeki bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni iyi tahmin ettiğini gösterir. Kurulan modelin performansını ölçmek için bu çalışmada ortalama mutlak hata oranı (MAPE %) metodu kullanılmıştır. MAPE metodu denklem (2)'de gösterilmiştir, (Ayvaz & Kusakci, 2017).

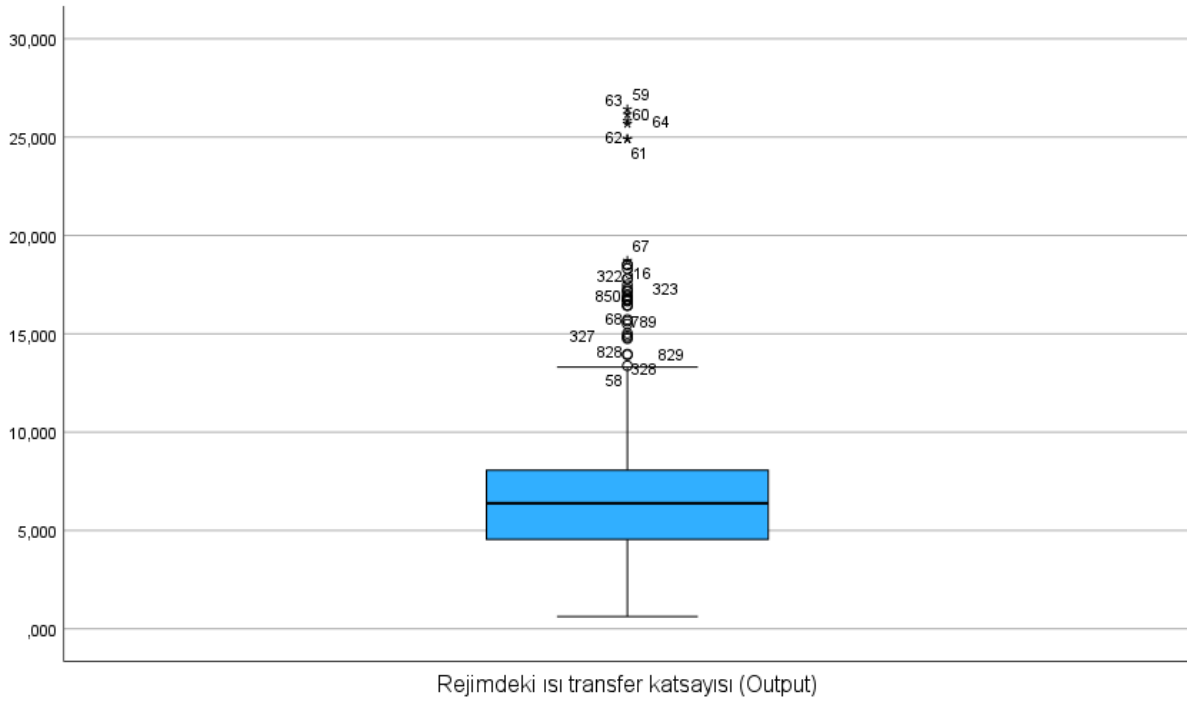
$$MAPE(\%) = 100 \times \frac{\sum_{k=1}^n n \left| \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{y_r} \right|}{n} \quad (2)$$

Denklem (2)'de belirtilen MAPE (%) değerinin %50'den büyük olması durumu modelin kötü tahminde bulunduğunu göstermekle beraber, MAPE (%) değerinin %10'a eşit ve küçük olduğu durumda modelin iyi tahminde bulunabildiğini gösterir, (Kayakuş & Terzioğlu, 2021).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada çoklu regresyon analizi yöntemi ile tek bağımlı değişken (HTC - CO₂'nin kaynamalı rejimdeki ısı transfer katsayısı) ve 26 bağımsız değişken (Tablo 2) olarak belirlenmiş ve bu değişkenlere ait 1084 adet veri IBM SPSS v.29 istatistik programı ile incelenmiştir. İlk olarak veriler programa aktarılarak normal dağılım uygunluk analizi yapılmıştır. Bu analizde özellikle bağımlı değişken olan HTC verisinde 59-64 satırlar arasındaki verinin geri kalanına göre outlier yani aykırı olduğu görülmüştür. İlgili verinin SPSS normal dağılım noktasal görüntüsü aşağıda Şekil 1'de verilmiştir. Bunun yansira normal dağılım analizinde çarpıklık (skewness) katsayısı 1.77, basıklık (kurtosis) katsayısı 6.72 sağa ve sola yaslanmış değerleri olarak gözlenmiştir. Genel olarak bu değerlerin en çok -3 ile +3 veya -1.5 ile +1.5 değerleri arasında normal kabul edildiği ifade edilmektedir (Kalayci, 2014), (Tabachnick & Fidell, 2013).

Modeldeki diğer bağımsız veriler de incelendiğinde yukarıda bahsedilen durumun onların üzerinde de etkili olduğu görülmüş ve bunun üzerine modelin regresyon analizi uygunluğunu bozmaması açısından ilgili veriler analizden çıkarılmıştır. Böylece yapılan ikinci normal dağılım uygunluk analizinde skewness katsayısı 1.77 den 1 değerine, kurtosis katsayısı 6.72 den 2.2 değerine düşmüş dolayısı ile regresyon için normal dağılım uygunluğu sağlanmıştır.



Şekil.1 HTC Normal Dağılım Analizi Noktasal Görünümü

Çoklu regresyon analizinin uygulanmasından önce yapılması gereken bir diğer temel analiz de faktör analizidir. Faktör analizi ile kullanılacak değişkenlerin arasındaki uyum test edilerek birbirini çok etkileyen ya da hiç etkilemeyen parametrelerin tespit edilmesi sağlanır. Bu çalışmada toplam 26 bağımsız değişken için faktör analizi yapılmıştır. Buna göre tüm değişkenlerin birbiri arasında ki korelasyon katsayılarının $-1 < r < +1$ aralığı içerisinde olduğu görülmüştür. Bu aralık içerisinde negatif yönlü ya da pozitif yönlü olarak korelasyon katsayılarının yüksek çoğunluğunun r değeri yine 0.1 üstü ya da 0.9 altı arasında değişkenlik göstermiştir. Yine üretilen faktör analizi tablosunda değişkenlerin ortak varyansa etkisi incelenmiştir ve değişkenlerin hepsinin 1'e yakın olduğu yani parametreler arasında anlamlı bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan gözlemlenen korelasyon katsayıları arasındaki hata oranları incelenmiş olup 0.05'ten yüksek korelasyon katsayı hata oranı % 37 olarak görülmüştür. Bu değer değişken sayısı ve değişken değerlerindeki uç değerlerin deneysel çalışmalardan dolayı farklılık gösterdiğinden kabul edilebilir değer olan % 50 yi aşmadığı için korelasyonun anlamlı olduğunu belirlenmiştir. Tablo 3'ten görüleceği gibi 1'in üzerinde olan faktör geçerlilik oranlarının % 50 değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre ölçme aracımızın ölçmek istediği amacı gerçekleştirebilecek düzeyde olduğu ortaya çıkmaktadır.

Tablo 3. Açıklanmış Toplam Varyans

Değişkenler	Toplam	Varyans %	Toplam %
1	14.372	53.231	53.231
2	3.640	13.483	66.713
3	2.979	11.034	77.747
4	2.253	8.343	86.090
5	1.104	4.089	90.179

Regresyon analizi yapmadan önce ayrıca bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki olup olmadığı yine IBM SPSS programı kullanılarak ilgili veriler üzerinden bakılmıştır ve sonuç olarak 26 bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasında negatif ya da

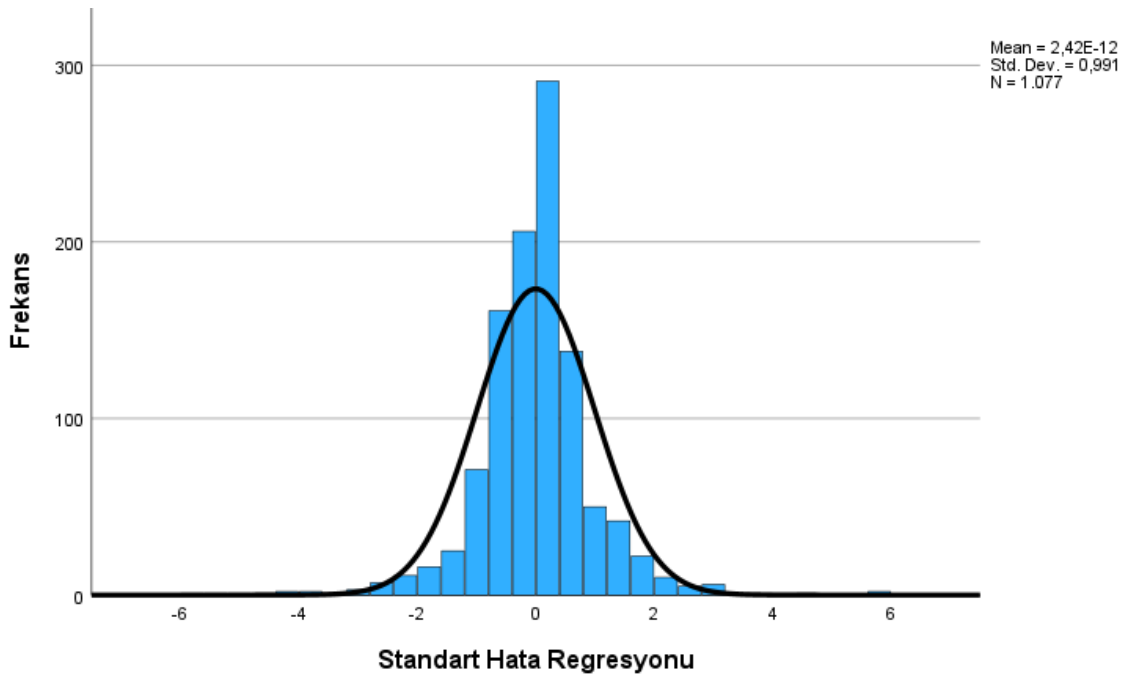
pozitif yönde bir doğrusal ilişki olduğu gözlenmiştir. SPSS programında regresyon analizi koşuturulduğunda çıkan analiz sonuçlarına göre öncelikle uç değerler standart hata değeri -5 ile +5 değeri arasında olduğu görülmektedir. Bu değer genelde -3 ile +3 arasında olması beklenirken bu çalışma kapsamında deneysel verilerin çok fazla olması ve değersel farklılıklardan dolayı yine -5 ile +5 kabul sınırları içerisinde olduğu kabul edilmiştir. İlgili SPSS tablosu aşağıda Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tablo 4. Hata İstatistikleri

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	2.03762	13.95695	6.61861	2.287623	1077
Std. Predicted Value	-2.003	3.208	.000	1.000	1077
Standard Error of Predicted Value	.120	.886	.237	.095	1077
Adjusted Predicted Value	2.05313	13.78087	6.61798	2.286459	1077
Residual	-10.774694	11.015661	.000000	1.856302	1077
Std. Residual	-5.753	5.882	.000	.991	1077
Stud. Residual	-5.869	5.918	.000	1.006	1077
Deleted Residual	-11.214494	11.153771	.000633	1.911441	1077
Stud. Deleted Residual	-5.964	6.016	.000	1.010	1077
Mahal. Distance	3.443	239.660	18.982	21.499	1077
Cook's Distance	.000	.073	.002	.006	1077
Centered Leverage Value	.003	.223	.018	.020	1077

a. Dependent Variable: Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Output)

Tablo 4'te gösterilen diğer bir parametre olan Cook's distance oranlarının 1 den küçük olması deneysel verilerin arasındaki uç değerlerin kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Regresyon analizinde başka önemli gösterge olan tahminlere ait hataların normal dağılıp dağılmadığı Şekil 2 de grafiksel olarak görülmektedir. Yaygın anlayışa göre regresyon analizinde değişkenlerin normal dağılıma uyması gerektiği gibi bir algı varken bu tür değişken sayısı çok olan çalışmalarda değişkenlerin değil hataların dağılımının normal dağılıma uygunluğu incelenmelidir.



Şekil 2. Tahminlere Ait Hataların Normal Dağılım Grafiği

Regresyon analizi sonucu ortaya çıkan modelde hataların birbirinden bağımsız olup olmadığını modelin özet kısmından anlaşılmaktadır. Tablo 5’te gösterilen model özetine göre Durbin Watson değeri 0.45 olduğu görülmektedir. Hataların bağımsız olup olmadığını söyleyebilmek için bu oranın 1 ile 3 arasında olmasının yeterli olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile bu model de hataların birbirinden bağımsız olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 5. Regresyon Modeli Özet Tablosu

	R	R²	Adj. R²	Tahmini Standart Hata	Durbin-Watson
Model	0,777 ^a	0,603	0,596	1,872911	0,454
a. Tahminleyiciler: (Sabit), Islanan yüzey (A), Sıvı Pr sayısı (PrL), Froude sayısı (Fr), Buhar Pr sayısı (PrL), Martinelli sayısı (Xtt), Buhar Re sayısı (Rev), Q (ısı akısı), Bond sayısı (Bo), Buhar kalitesi (x), Sıvı Weber sayısı (We), Yüzey gerilimi (σ), G (kütle akısı), Boşluk oranı (ϵ), Buhar ısı iletkenliği (kv), Boru iç çapı (Dm), Buhar Weber sayısı (We), Buhar viskozite (μ_v), İndirgenmiş basınç (Pr), Sıvı viskozite (μ_L)					
b. Bağımlı değişken: Rejimdeki ısı transfer katsayısı					

Regresyon analizi sonucunda üretilen önemli verilerden bir diğeri de korelasyon analizidir. Regresyon analizi sonucunda ayrıca aşağıda Tablo 6 olarak gösterilen pearson korelasyonu tablosu üretilmektedir.

Tablo 6. Pearson Korelasyonu

	HTC (Output)
HTC (Output)	1,000
Boru iç çapı (Dm)	-0,558
Buhar kalitesi (x)	-0,076
G (kütle akısı)	0,487
Q (ısı akısı)	0,601
Doyma sıcaklığı (Ts)	0,368
İndirgenmiş basınç (Pr)	0,367
Toplam basınç (Ptot)	0,367
Sıvı viskozite (μ_L)	-0,356
Buhar viskozite (μ_v)	0,347
Sıvı Özgül Isı (cpL)	0,330
Buhar Özgül Isı (cpv)	0,334
Sıvı ısı iletkenliği (kL)	-0,277
Buhar ısı iletkenliği (kv)	0,366
Sıvı özkütle (ρ_L)	-0,353
Buhar özkütle (ρ_v)	0,346
Yüzey gerilimi (σ)	-0,363
Bond sayısı (Bo)	-0,457
Sıvı Weber sayısı (We)	0,429
Buhar Weber sayısı (We)	0,413
Martinelli sayısı (Xtt)	0,160
Buhar Re sayısı (Rev)	0,132
Froude sayısı (Fr)	0,272
Sıvı Pr sayısı (PrL)	-0,036
Buhar Pr sayısı (PrL)	0,294
Boşluk oranı (ϵ)	-0,184
Islanan yüzey (A)	-0,291

Tablo 6’da tüm değişkenlerin bir biri ile olan ilişki değeri gösterilmektedir fakat tablonun büyüklüğünden dolayı çalışma içerisine sadece bağımsız değişken HTC parametresi ile diğer bağımlı değişkenler arasındaki ilişki değerleri gösterilmiştir. Bu tablodan anlaşılacağı gibi korelasyon katsayısı olan “r” değerinin bazıları eksi olarak görünmektedir. Pearson korelasyonunda en iyi anlamlı ilişki değeri olarak 0.7 üzeri olması benimsenmiştir. Bu değer altı zayıf ve bu değer üstü çok güçlü korelasyonu göstermektedir. Dolayısı ile tablodan görüleceği üzere bağımlı değişken ile en güçlü ilişkinin pozitif yönde Q ısı akısı olduğu ve en zayıf korelasyon ilişkisinin de negatif yönde sıvı Pr sayısı olduğu anlaşılmaktadır.

Model ile ilgili genel değerlendirmeyi yapabilmek için tekrar Tablo 5 te gösterilen regresyon modeli özetine bakılmalıdır. Özet tablosunda R katsayısından anlaşılacağı üzere bağımsız değişkenlerin kombinasyonunun bağımlı değişkene olan korelasyonunu 0.777 gibi oldukça yüksek bir değer olarak vermektedir. R^2 değeri ise bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıkladığı varyansı 0.6 olarak göstermektedir. Yine bu değer % 60 seviyelerde olması modelin değişkenler tarafından tahmin edilme oranının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Aynı tabloda yine görüleceği gibi adjusted R^2 değeri de yaklaşık 0.6 dır. Bu da çok sayıda bağımsız değişkenlerin olduğu çoklu regresyon analizi modellerinde göz önüne alınması gereken ve bağımlı değişkende ki değişimi açıklama oranını gösteren bir değerdir. Bu değerlerin yeterli olmadığını düşünüldüğü modellerde ayrıca ANOVA tablosunda bulunan değerlere de bakılabilmektedir.

Yukarıda detayı verilen regresyon analizi sonuçları bağımlı değişken ile bağımsız değişkenlerin arasında ki korelasyonun ne derece ilişki içinde olduğunu göstermiştir. Çalışmanın güvenilirliğini artırabilmek için bağımsız değişkenlerin sayısı yapılan ilk regresyon analizi raporunda bağımlı değişken ile zayıf ilişkisi olanlar çıkartılarak azaltılmış ve regresyon analizi tekrarlanmıştır. İkinci regresyon analizinde tablo 6’da gösterilen 26 bağımsız değişken yerine ilk analiz sonuçlarına göre en başarılı korelasyon ilişkisi gösteren hata oranları düşük 5 bağımsız değişken (Kütle Akısı (G), Isı Akısı (Q), Bond Sayısı (Bo), Boru iç çapı, Buhar Weber Sayısı) seçilmiş (Tablo 7 ve Tablo 8) ve bu değişkenler kullanılarak ikinci bir regresyon analizi yapılmıştır. Bu değişkenlerden ilk analizde bağımlı değişken ile yüksek korelasyon sağlayan Sıvı Weber Sayısı, Bond sayısı ile arasında anlamlı bir ilişki bulunmadığının görülmesinden dolayı son bağımsız değişken listesine alınmamıştır.

Tablo 7. İkinci Regresyon Analizi Değişken Tablosu

İstatistiksel Oranlar	Ortalama	Std. Sapma	N
Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Output)	6,62	2,95	1077
Boru iç çapı (Dm)	,0060	,0025	1077
G (kütle akısı)	271,63	199,19	1077
Q (ısı akısı)	12,59	8,04	1077
Bond sayısı (Bo)	635,92	440,94	1077
Buhar Weber sayısı (We)	13029,90	19544,69	1077

Tablo 8. İkinci Regresyon Analizi Değişkenler Arası Korelasyon Tablosu

Bağımlı ve Bağımsız Değişkenler		Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Bağımlı Değ.)	Boru iç çapı (Dm)	G (kütle akısı)	Q (ısı akısı)	Bond sayısı (Bo)	Buhar Weber sayısı (We)
Pearson Korelasyonu	Rejimdeki ısı transfer katsayısı (Bağımlı Değ.)	1,000	-,558	,497	,603	-,457	,419
	Boru iç çapı (Dm)	-,558	1,000	-,490	-,467	,858	-,242
	G (kütle akısı)	,497	-,490	1,000	,599	-,292	,913
	Q (ısı akısı)	,603	-,467	,599	1,000	-,220	,622
	Bond sayısı (Bo)	-,457	,858	-,292	-,220	1,000	-,061
	Buhar Weber sayısı (We)	,419	-,242	,913	,622	-,061	1,000

Yapılan ikinci regresyon analizi sonuçlarına göre, değişkenler arası korelasyonların birbirleri ile pozitif ya da negatif yönde orta ve yer yer yüksek düzeylerde (0,4 - 07 arası) güçlü bir ilişki olduğu Tablo 8’de görülmektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenlerin birbirleri arasında ki zayıf ve zıt yönlü korelasyonlara rağmen tüm değişkenlerin analize katıldığı ilk regresyon analizi korelasyon katsayısının (0,77), birbirleri ile yüksek oranda korelasyon sağlayan değişkenlerin kullanıldığı ikinci regresyon analizi sonucunda belirlenen korelasyon katsayısından az da olsa yine de yüksek olduğu görülmüştür. Yapılan ikinci regresyon analizi rapor özeti tablo 9’ da verilmiştir.

Yine bu tablodan görüleceği gibi bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıkladığı varyans R^2 değeri ikinci analizde 0.49 olarak hesaplanmıştır. İki regresyon analizi sonucunda bağımsız değişkenlerin birbirleri arasında ki korelasyona göre azaltılması aslında korelasyon katsayısında çok büyük bir değişime yol açmamıştır.

Tablo 9. İkinci Regresyon Analizi Model Özeti

Model	R	R^2	Adj. R^2	Tahmini Standart Hata	Durbin-Watson
1	,70 ^a	,49	,48	2,12	,34
a. Tahminleyiciler: (Sabit), Buhar Weber sayısı (We), Bond sayısı (Bo), Q (ısı akısı), Boru iç çapı (Dm), G (kütle akısı)					
b. Bağımlı Değişken: Rejimdeki ısı transfer katsayısı					

3.1. Sonuçların Analizi

Bu çalışmada, farklı deneysel çalışmalarla elde edilmiş toplam 1077 veri ile kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısı (HTC) nin tahmin edilmesi amaçlanmış ve bu kapsamda ısı transferi katsayısını etkileyen 26 bağımsız değişken belirlenmiş ve çoklu regresyon analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle regresyon analizinin yapılması için gerekli olan şartların sağlanması amacı ile normal dağılım ve doğrusallık gibi ön testler SPSS programı üzerinden yapılmıştır. Sonrasında yine çoklu regresyon analizinde bir diğer önemli gösterge olan korelasyon analizi yapılmış ve sonuçları bulgular kısmında paylaşılmıştır. Tüm bu değerlendirmeler kapsamında çoklu regresyon analizi 26 değişken kullanılarak SPSS programında yürütülmüş ve analiz sonucunda anlamlı bir regresyon modeli olarak $F(19, 1057) = 84.48$, $p < 0.001$ ve bağımlı değişkendeki varyansın % 60’ının ($R^2_{\text{adjusted}} = 0.596$) bağımsız değişkenler tarafından açıklanabildiği görülmüştür. Buna göre, örnek olarak Buhar kalitesi (x) değişkeni HTC yi olumlu ve anlamlı olarak tahminlemiştir, Beta = 0.129, $t(1057) = 1.842$, $p < 0.00$ olarak aşağıdaki tablo 10’da görülen değerler analiz raporunda elde edilmiştir.

Tablo 10. Bağımsız Değişkenlerin Anlamlılık Değerleri

	Standart olmayan katsayılar		Std. Katsayısı	t	Anlamlılık Oranı	
	B	Std. Error	Beta			
Bağımsız Değişkenler	(Sabit)	268.727	26.970		9.964	<.001
	Boru iç çapı (Dm)	930.811	126.940	.795	7.333	<.001
	Buhar kalitesi (x)	1.503	.816	.129	1.842	.066
	G (kütle akısı)	.014	.002	.966	6.529	<.001
	Q (ısı akısı)	.146	.012	.400	11.956	<.001
	İndirgenmiş basınç (Pr)	15.095	12.380	.897	1.219	.223
	Sıvı viskozite (μ L)	-.890	.097	-9.825	-9.214	<.001
	Buhar viskozite (μ v)	-19.730	2.186	-10.643	-9.028	<.001
	Buhar ısı iletkenliği (kv)	3104735.368	327938.449	4.895	9.467	<.001
	Yüzey gerilimi (σ)	64642.490	9342.395	6.532	6.919	<.001
	Bond sayısı (Bo)	-.006	.001	-.904	9.730	<.001
	Sıvı Weber sayısı (We)	.000	.000	.539	3.693	<.001
	Buhar Weber sayısı (We)	.000	.000	-.973	4.218	<.001
	Martinelli sayısı (Xtt)	-.353	.115	-.143	3.062	.002
	Buhar Re sayısı (Rev)	-1.504	4.634	-.019	-.325	.746
	Froude sayısı (Fr)	-.047	.010	-.258	4.607	<.001
	Sıvı Pr sayısı (PrL)	6.431E-8	.000	.024	1.056	.291
	Buhar Pr sayısı (PrL)	1.550E-5	.000	1.911	6.822	<.001
	Boşluk oranı (ϵ)	-6.318	1.646	-.359	3.837	<.001
	Islanan yüzey (A)	-19294.483	14132.733	-.054	1.365	.172

Yukarıdaki tablodan görüleceği şekilde 26 bağımsız değişkenin tamamı olumlu ve anlamlı değerlere sahip olmasa da tüm bağımsız değişkenlerin model içerisinde bağımsız değişkeni belirli oranlarda etkilediği ve buna göre toplamda % 66 hata oranı ile tahminleme yapabildiği belirlenmiştir. Genel olarak bakıldığında IBM SPSS v.29 istatistiksel analiz programı kullanılarak yapılan bu çoklu regresyon analizinin çok sayıda değişken ve veriye rağmen yüksek oranda bir anlamlılık ortaya koyduğu görülmüştür.

Çalışmanın güvenilirliğinin artırılması amacı ile SPSS Regresyon analizi ilk korelasyon raporuna göre nispeten zayıf değişkenler çıkartılarak bağımlı değişken ile korelasyonu en yüksek (0.4 – 0.7 arası) beş değişken seçilerek ikinci bir regresyon analizi yapılmıştır. İkinci analiz sonuçlarında Tablo 8 ve Tablo 9 da görüleceği gibi ilk yapılan regresyon analizine göre korelasyon katsayısı ve açıklanan varyansın daha düşük kaldığı gözlenirse de ilk analize göre belirlenen beş değişkenin bağımlı değişken olan kaynamalı akış rejiminde oluşan ısı transfer katsayısını (HTC) en çok etkileyen ve tahmin edilmesini sağlayan değişkenler olarak gözlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

CO₂ gazı, termofiziksel özelliklerinden dolayı diğer konvansiyonel gazlardan farklı davranışlar gösterebilmektedir. CO₂, yüksek kritik basınç ve düşük kritik sıcaklığa sahip olmasına rağmen doyma sıcaklığı, ısı transfer katsayısı üzerinde (HTC) diğer gazlara göre daha etkin olduğu görülmüştür. Bu özelliklerinden dolayı günümüzde soğutma gazı olarak kısıtlı kullanımı olmasına rağmen genel olarak CO₂'nin ısı transfer katsayısının çekirdek bölgesinde en iyi performansı gösterdiği iyi bilinmektedir. Bununla birlikte CO₂'nin iki fazlı akış özelliklerini önemli ölçüde etkileyen CO₂'nin çok yüksek basınç ve düşük yüzey gerilimleri nedeniyle yatay borulardaki CO₂ buharlaşması için önemli bir kriter olduğu görülmüştür.

Bu çalışma da öncelikle CO₂ gazının ısı transfer katsayısı (HTC) üzerinde direk etkisi bulunan kriterlerin literatür çalışması ile tespiti sağlanmış ve bu kriterlere ait çeşitli kaynaklardan 1071 satır deneysel veri elde edilmiştir. Bu veriler kullanılarak günümüzde en çok kullanılan istatistiksel analiz yöntemlerinden regresyon analizi ile önce faktörler arası korelasyonun varlığı ortaya konmuş ve sonrasında en güçlü korelasyonu gösteren değişkenler tespit edilmiştir. CO₂ iki fazlı akış kaynama ısı transfer katsayısı bağımlı değişken olarak analize dahil edilmiş ve literatür araştırması ile tespit edilen 26 kriter bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde bu kadar geniş bir kriter setinin kullanıldığı bir araştırmaya rastlanmamıştır. Regresyon analizi IBM-SPSS programında çalıştırılmış ve program tarafından üretilen raporda hem verilerin analizi hem de değişkenler arası korelasyon incelenmiştir. Veriler içerisinde korelasyonu bozan ve regresyon analiz sonucunu olumsuz yönde etkileyebilecek uç değerler tespit edilerek ayıklanmıştır. İlk regresyon analizinde ortaya çıkan ve bağımlı değişkeni etkileyen kriterler alınarak tekrar ikinci bir analiz yapılmış ve regresyon katsayısı yeniden belirlenmiştir. Böylece CO₂ gazının ısı transfer katsayısı (HTC) yi en çok etkileyen ve tahmin edilme olasılığını artırdığı düşünülen beş kriterin tespit edilmesi sağlanmış ve korelasyon katsayısının (R) 0.7 gibi yüksek bir oran olduğu görülmüştür. Yine ilgili tablolardan görüleceği gibi determinasyon katsayısı yani açıklanan varyansın (R²) en az yaklaşık yüzde 50 oranında değişkenler arasında ki ilişkinin var olabileceğini göstermiştir.

Bu çalışma sonucunda CO₂'nin soğutucu akışkan olarak kullanıldığı verimli soğutma sistemi ürünlerinin, laboratuvar ölçeğinden prototip ve nihai ürün aşamasına geçiş için kaynamalı akış bölgesinde ısı transfer katsayısı tahmin korelasyonları üzerine çalışmalar yapılmasının önemli olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın klasik istatistiksel yöntemler dışında yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi diğer sezgisel makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak tekrarlanması ile daha başarılı sonuçların alınabileceği düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Marmara Üniversitesi BAP birimi tarafından FYL-2022-10426 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- Al-Zaidi, A. H., Mahmoud, M. M., & Karayiannis, T. G. (2022). Flow boiling in copper and aluminium microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123101, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123101>.
- Arslan, B., & Ertuğrul, İ. (2022). Çoklu Regresyon, arima ve yapay sinir ağı yöntemleri ile türkiye elektrik piyasasında fiyat tahmin ve analizi. *Journal of Management and Economics Research*, 20(1), 331-353. <http://dx.doi.org/10.11611/yead.988146>.
- Ayvaz, B., & Kusakci, A. O. (2017). Electricity consumption forecasting for Turkey with nonhomogeneous discrete grey model. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 12(3), 260-267. <http://dx.doi.org/10.1080/15567249.2015.1089337>.
- Bansal, P. K., & Zhao, X. (2007, Mayıs, 28-31). *Flow boiling heat transfer of CO2 at low temperatures-a critical review*. 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim. Norveç.
- Bruno, F., Belusko, M., & Halawa, E. (2019). CO₂ refrigeration and heat pump systems—a comprehensive review. *Energies*, 12(15), 2959. <https://doi.org/10.3390/en12152959>.
- Chen, S., Mao, J., & Han, X. (2016). Heat transfer analysis of a vertical ground heat exchanger using numerical simulation and multiple regression model. *Energy and Buildings*, 129, 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.010>
- Cheng, L., Ribatski, G., & Thome, J. R. (2008). New prediction methods for CO₂ evaporation inside tubes: Part II—An updated general flow boiling heat transfer model based on flow patterns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(1-2), 125-135. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.04.001>.
- Cheng, L., Xia, G., & Thome, J. R. (2021). Flow boiling heat transfer and two-phase flow phenomena of CO₂ in macro-and micro-channel evaporators: Fundamentals, applications and engineering design. *Applied Thermal Engineering*, 195, 117070. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117070>.
- Di Filippo, R., Bursi, O. S., & Di Maggio, R. (2022). Global warming and ozone depletion potentials caused by emissions from HFC and CFC banks due to structural damage. *Energy and Buildings*, 273, 112385. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112385>.
- Dönmez, N.P. (2012). *In tube evaporation of carbon dioxide with and without oil* [Doktora tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.
- Eygü, H. & Kılınç, A. (2020). Oecd Ülkelerinin Lojistik Performans Endekslerinin Ridge Regresyon Analizi ile Araştırılması. *Trakya Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 22(2), 899-919. <https://doi.org/10.26468/trakyasobed.688737>.
- Fang, X., Zhou, Z., & Li, D. (2013a). Review of correlations of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide. *International Journal of Refrigeration*, 36(8), 2017-2039. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.05.015>.

- Fang, X. (2013b). A new correlation of flow boiling heat transfer coefficients for carbon dioxide. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 64, 802-807. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.024>.
- Grauso, S., Mastrullo, R., Mauro, A. W., & Vanoli, G. P. (2011). CO₂ and propane blends: Experiments and assessment of predictive methods for flow boiling in horizontal tubes. *International Journal of Refrigeration*, 34(4), 1028-1039. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.03.001>.
- Jiang, L., Liu, J., Zhang, L., Liu, Q., & Xu, X. (2017). Characteristics of heat transfer for CO₂ flow boiling at low temperature in mini-channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2120-2129. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.12.113>.
- Jianxin, P., & Yigang, L. (2009). Estimation of the surface tension of liquid carbon dioxide. *Physics and Chemistry of Liquids*, 47(3), 267-273. <https://doi.org/10.1080/00319100701824389>.
- Kalayci, S. (2014). SPSS uygulamalı çok degiskenli istatistik teknikleri (6. Baski). *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara.
- Kayakuş, M., & Terzioğlu, M. (2021). Yapay sinir ağları ve çoklu doğrusal regresyon kullanarak emeklilik fonu net varlık değerlerinin tahmin edilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(1), 95-103. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.742995>.
- Kim, S., & Hrnjak, P. S. (2012, Temmuz, 16-19). *Effect of oil on flow boiling heat transfer and flow patterns of CO₂ in 11.2 mm horizontal smooth and enhanced tube*, International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Indiana. 2519-2528.
- Li, W., Zheng, B., Lv, T., & Ayub, Z. (2020). A modified correlation for flow boiling heat transfer in plate heat exchangers. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 12(6), 6-14. <https://doi.org/10.1115/1.4046786>.
- Mastrullo, R., Mauro, A. W., Rosato, A., & Vanoli, G. P. (2010). Carbon dioxide heat transfer coefficients and pressure drops during flow boiling: Assessment of predictive methods. *International Journal of Refrigeration*, 33(6), 1068-1085. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.04.005>.
- Mistral (2022). Mistral Programs for Refrigeration & Air Conditioning Professionals başlığı ile https://www.mistralassociates.com/co2_temperature_pressure_enthalpy_entropy_viscosity.html adresinden 21 Aralık 2022 tarihinde alınmıştır.
- Oh, H. K., & Son, C. H. (2011). Flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics of CO₂ in horizontal tube of 4.57-mm inner diameter. *Applied Thermal Engineering*, 31(2-3), 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.026>.
- Oh, J. T., Pamitran, A. S., Choi, K. I., & Hrnjak, P. (2011). Experimental investigation on two-phase flow boiling heat transfer of five refrigerants in horizontal small tubes of 0.5, 1.5 and 3.0 mm inner diameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 54(9-10), 2080-2088. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.12.021>.
- Özdemir, M.R. (2016). *Single-phase flow and flow boiling of water in rectangular metallic microchannels* [Doktora tezi]. Brunel University London Graduate School. London.

- Parahovnik, A., & Peles, Y. (2022). High pressure saturated flow boiling of CO₂ at the micro scale. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 86, 122449. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.1224490017-9310>.
- Park, C. Y., & Hrnjak, P. S. (2007). CO₂ and R410A flow boiling heat transfer, pressure drop, and flow pattern at low temperatures in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*. 30(1), 166-178. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.08.007>.
- Scalabrini, G., Marchi, P., Finezzo, F., & Span, R. (2006). A reference multiparameter thermal conductivity equation for carbon dioxide with an optimized functional form. *Journal of Physical and Chemical Reference data*, 35(4), 1549-1575. <https://doi.org/10.1063/1.2213631>.
- Span, R., & Wagner, W. (1996). A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 25(6), 1509-1596. <https://doi.org/10.1063/1.555991>.
- Tabachnick, B.G., Fidell, L.S. (2013). Using multivariate statistics (6th Edn.). *Pearson Education*, Boston.
- Yun, R., Kim, Y., Kim, M.S. (2005). Convective boiling heat transfer characteristics of CO₂ in microchannels, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 235–242.
- Zhang, L., Liu, J., Yang, J., & Ge, Q. (2012, Mart, 27-29). *Study of Heat Transfer for CO₂ Flow Boiling in Horizontal Small Diameter Tubes*, IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Şangay.1-4.
- Zhang, J., Elmegaard, B., & Haglind, F. (2021). Condensation heat transfer and pressure drop correlations in plate heat exchangers for heat pump and organic Rankine cycle systems. *Applied Thermal Engineering*. 183, 116231. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116231>.



Araştırma Makalesi / Research Article

**ELEKTROMANYETİK KİRLİLİK ORTAMINDA KAOLİNİT/PVA
KOMPOZİTLERİN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA
ÖZELLİKLERİ**

**ELECTROMAGNETIC SHIELDING EFFECT PROPERTIES OF KAOLINITE/PVA
COMPOSITE IN ELECTROMAGNETIC POLLUTION ENVIRONMENT**

Ethem İlhan ŞAHİN¹

Mehriban EMEK²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1252709>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
shnethem@gmail.com

Geliş Tarihi / Received
18.02.2023

Kabul Tarihi / Accepted
24.04.2023

Öz

Bu çalışmada, kaolinit-PVA kompozitlerini oluşturmak için geleneksel oksitlerin karışımı yöntemi kullanılmıştır. $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ kimyasal denklemine sahip tek fazlı kaolinit bileşiği, $1150^\circ C$ 'de 4 saat sinterlendikten sonra elde edildi. Yapısal araştırma için çeşitli miktarlarda kaolinit-PVA üretildi. Yapısal analiz için X-ışını kırınımı (XRD) yapıldı, bu da $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ 'te ikincil fazın oluşmadığını gösterdi. Ayrıca çeşitli oranlarda $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ -PVA bileşimleri ve epoksi tozu kullanılarak mikrodalga kalkanlama etkili kompozitler sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Bir ağ analizör cihazı kullanılarak, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ /PVA kompozitlerinin mikrodalga ekranlama etkisi 6-18 GHz aralığında incelenmiştir. 1.4 mm kalınlıkta 6.92 GHz'de minimum -47.02 dB ekranlama etkisi değeri elde edilmiştir. $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ /PVA bileşikler kompozit malzeme olarak üretilmiş ve kalkanlama etkisi için özellikleri karakterize edilmiştir. Daha yüksek ve gerekli frekans bantlarında çalışmak için, kompozitlerdeki bileşenlerin miktarı ayarlanarak, mikrodalga kalkanlama etkisi performansı değiştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Kaolinit, mikrodalga kalkanlama etkinliği, matris kompozit, PVA.

Abstract

In this study, the traditional mixed oxides method was used to create kaolinite-PVA composites. The single phase kaolinite compound with the chemical equation $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ was generated after sintering at $1150^\circ C$ for 4 h. For the structural investigation, various quantities of kaolinite-PVA were generated. X-ray diffraction (XRD) was carried out for the structural analysis, which indicated that second phase did not form in $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. In addition, by using $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ /PVA compositions and epoxy powder in various proportions, microwave shielding effectiveness composites were manufactured by hot pressing method. Utilizing a network analyser device, the microwave shielding effect of $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ /PVA composites were investigated in the range of 6-18 GHz. A minimum shielding effect value of -47.02 dB was obtained at 6.92 GHz at 1.4 mm thickness. The $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ -PVA compounds were produced as composite material and their properties were characterized for shielding effect. To work in higher and required frequency bands, by adjusting the amount of components in the composites, the performance of the microwave shielding effect can be changed.

Keywords: Kaolinite, microwave electromagnetic shielding effect, matrix composite, PVA.

¹Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Adana, Türkiye. shnethem@gmail.com, Orcid.org/0000-0001-7859-9066.

²Adıyaman Üniversitesi, Gölbaşı Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Gölbaşı, Adıyaman, Türkiye. emekmehriban@gmail.com, Orcid.org/0000-0001-7322-9808.

1. GİRİŞ

Kablosuz iletişim teknolojisine bağlı olarak elektronik cihazların ve uydu haberleşme ağlarının yaygınlaşması nedeniyle yüksek frekanslı uygulamalara olan talep artmıştır. GHz frekans bölgesindeki elektromanyetik dalgalar, iletişim sistemlerinde ve çeşitli elektronik cihazlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. GPS, kablosuz iletişim ve mobil cihazlar dahil olmak üzere elektronik teknolojilerinin hızla ilerlemesi ve minyatürleşmesiyle sonuçlanan aşırı elektromanyetik radyasyon, artık diğer kirlilik nedeni olarak sayılmakta, insan sağlığı ve çevre için tehdit oluşturmaktadır (Wang ve ark., 2022; Şahin, 2022; Qasrawi, 2022). Elektromanyetik dalgalar iletişim sistemlerinde aşırı kullanıldığında, elektromanyetik girişim (EMI) olarak bilinen elektromanyetik kirliliğin olumsuz genişlemesine katkıda bulunan çok sayıda istenmeyen elektromanyetik dalga oluşturmaktadır (Lalan ve Ganesanpotti, 2020). Elektromanyetik radyasyon, çok sayıda elektronik cihazın hassasiyeti ve işlevselliği ile birlikte günlük yaşamın çeşitli yönleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olabilmektedir. Sessiz ve görünmez yüksek yoğunluklu elektromanyetik dalgalara uzun süre maruz kalmak, genetik fonksiyona ve bağışıklık fonksiyonuna etkinin yanında, fizyolojik olarak değişikliklere ve sağlık sorunlarına neden olabilmektedir (Panagopoulos ve Margaritis, 2010; Zaroushani ve ark., 2015). Elektromanyetik dalga maruziyetini önlemek ve azaltmak için, kişisel koruyucu ekipman kullanmak gibi, maruz kalma süresinin sınırlandırılması, maruz kalma düzeylerinin kabul edilebilir seviyelere düşürülmesi benzeri mühendislik teknikler vardır (Zaroushani ve ark., 2015). Sistemleri ve insanları bu elektromanyetik kirliliklerden korumak için EMI'ye karşı koruyucu zırhlama malzemelerinin kullanılması gerekmektedir. EMI kalkanları, istenmeyen EM dalgaları perdeleme yada ekranlama yaparak, malzeme tarafından emilmesine veya yansıtılmasına neden olan mekanizmalar kullanarak elektromanyetik dalgalardan koruma sağlayabilir (Lalan ve Ganesanpotti, 2020; Liu ve ark., 2016; Meisak ve ark., 2023).

EMI koruması üzerinde etkisi olan birkaç faktör vardır, bunlardan birincisi, mobil yük taşıyıcılarının (elektronlar veya delikler) gelen EM dalgalarıyla nasıl etkileşime girdiğine bağlı olan yansıma kaybıdır. İkincisi ise, manyetik ve elektriksel dipollerin EM dalgalarla etkileşiminden etkilenen absorpsiyon kaybıdır (Şahin, 2019). Çoklu yansıma etkisi olarak bilinen üçüncü mekanizma ise, koruyucu malzeme içindeki iç yansımaları ifade eder. Bu etki genellikle çok sayıda ve oldukça büyük yüzey veya ara yüzey bölgeleri olduğunda kendini gösterir (Hamouni ve ark., 2014; Shukla, 2020).

Elektromanyetik girişim, özellikle havacılıkta iletişim komuta, kontrol sistemine zarar verebilmektedir, ayrıca risk yaratarak kazalara neden olabilmektedir. Bu bağlamda, yeni ve geliştirilmiş frekans seçici EMI kalkanlama özelliği gösteren malzemeler daima dikkat çekmektedir (Avloni ve ark., 2007; Wang ve Liu, 2012). Ayrıca giyim sektöründe elektromanyetik koruyucu tekstil malzemelerinin çeşitli kullanımları olduğu gibi, nükleer araştırma tesislerinde de EMI radyasyon kalkanı beton tarzı malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang ve Liu, 2012). Sonuç olarak, elektromanyetik koruyucu özellik gösteren yeni malzemelerin araştırılması ve üretilmesi oldukça önemli hale gelmiştir. Sağlam ve giyilebilir özellikte olan kablosuz teknolojilerle sorunsuz bir şekilde birleştirilebilen EMI koruyucu malzemeler en başta sağlık açısından elektromanyetik korunma için önem arz etmektedir ve gereklidir. Yukarıda belirtilen sorunları ele almanın en etkili yöntemi, EMI koruyucu malzemelerin kullanılması olmalıdır. "Ekranlama etkinliği" terimi, ekranlama performansını (SE) tanımlamak için kullanılan bir ifadedir (Şahin ve ark., 2022).

Kaolinin ana maddesi kaolinittir. Kimyasal formülü $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ olan kaolinit, katmanlı bir silikat mineralidir. Metal elementler çoğunlukla cevher yataklarındaki kil mineralleri (kaolinit, montmorillonit ve mika gibi) üzerinde hidratlı veya hidroksil iyonları şeklinde adsorbe edilir. Hidratlı metal iyonlarının etkili bir adsorbanı, tipik bir 1:1 tipi kil minerali olan kaolinittir (Chen

ve ark., 2019). Kaolinit seramik, kağıt, refrakter malzemeler vb. üretimlerinde öncelikli çok önemli ham madde olarak kullanılır.

Kaolinit mineralin yüzey reaktivitesi, mekanik özellikleri hidrasyon ve adsorpsiyonun bir sonucu olarak değişir, bu nedenle dağılabilir özelliktedir (Shaikh ve ark., 2017). Bu nitelikleri nedeniyle kaolinit, çimento hamuru, çamur delme, mineral flotasyonu, atık susuzlaştırma, çevre koruma gibi uygulamalarda çok fazla umut vaat etmektedir (Anderson ve ark., 2010; Xing ve ark., 2017; Kang ve ark., 2019; Xu ve ark., 2017; Shakeel ve ark., 2021). İnorganik dolgu maddeleri genellikle hidrojelde doğrudan kimyasal değişiklik olsun veya olmasın kullanılır (He ve ark., 2019). Reaktif fonksiyona sahip hidroksil gruplarının çoğu, yoğun şekilde paketlenmiş alüminosilikat tabakalarında gizlenmiştir, çünkü kaolinitin yapısı, hidrojenle bağlanmış alüminosilikat tabakalarının birikmesiyle oluşur, ham kaolinit katmanlı bir agrega şeklini sergiler (Ding ve ark., 2021).

Polimer matrisli kompozitler geniş ürün yelpazesi sundukları için daha çok tercih edilmektedir, ayrıca bu kompozitler yeni malzemenin istenilen eksikliklerini giderebilirler (Topcu, 2020).

Polivinil alkol (PVA) suda çözünür özellikte olup, toksik (zararlı) olmayan, fiber, film ve jel formunda geniş çapta araştırılan ve uygulanabilen şeffaf sentetik polimerdir. PVA, güçlü bir hidrofilik yapıya ve hidrojen bağlama özelliğine sahiptir, böylece ince film veya zar oluşturabilmektedir (Castell ve ark., 2013; Mallapragada ve Peppas, 1996; Zhang ve ark., 2009). Polivinil alkol (PVA) hidrofil yapıda, biyoyoumluluğu olan, kimyasal yapı dayanıklılığı olan, sade yapışkanlık gösteren ve hidroksil grubunun basit modifikasyonu gibi avantajlarından dolayı yaygın kullanılan sentetik polimerlerdendir (İkiz, 2009). Ayrıca iyi film oluşturabilme özelliğine sahip PVA tekstil ve kimya endüstrisinde, seramik alanında, elektronik kaplama alanlarında, sağlık alanında, inşaat endüstrisinde kullanılmaktadır (Pivovar ve ark., 1999).

Daha önceki araştırmalarda elektromanyetik kalkanlama ölçümleri örneklerine bakıldığında, elde edilen grafen nanokompozitlerin x-band bölgesinde -30 dB kalkanlama etkinliği değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Santhosi ve ark., 2020). %0.25 MWCNT kompozitlerinin ölçümlerinde ise 1.6 GHz tek bant frekansında -39 dB ekranlama etkinliği değerine sahip olduğu belirlenmiştir (Tariq ve ark., 2015). Bir diğer çalışmada kırılmış elyaf tabanlı $ZnNb_2O_6$ kompozitlerin kalkanlama (ekranlama) etkinliği performansının 6.75 GHz frekansında -51.32 dB değerinde olduğu tespit edilmiştir (Şahin, 2022). Bir başka çalışmada ise polianilin tabanlı kolemanit:SiO₂ kompozitleri için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değerinin 16.09 GHz frekansında -41.1 dB değer verdiği belirlenmiştir (Şahin ve ark., 2020).

Ekranlama etkisinin kapasitesi, gelen elektromanyetik dalganın malzemedene ne kadar uzağa gittiği ile alakalıdır. Ekranlama etkisi değeri -10 dB değer gösterdiğinde, malzemeye gelen elektromanyetik dalganın %90 oranında azaldığı ve %10'unun karşıya geçtiği kabul edilmektedir (Chung, 2000; Ting ve ark., 2011).

Bu araştırmada, kaolinit/PVA optimum parametrelere göre bir bileşim kompoziti olarak üretildi ve kalkanlama etkinliği karakteristikleri belirlendi. Yeni elde edilen bu kompozitlerin bileşenleri farklı oranlarda alınmış ve epoksi tozu ile birleştirilmiş, sonrasında sıcaklıklı hidrolik pres makinesinde belirli kalıpta preslenerek kaolinit/PVA kompozitleri farklı oranlarda oluşturulmuştur. Bu kompozitlerin karakterizasyonu için XRD (Bruker / Alpha -T) cihazı kullanılmıştır (Şahin, 2019; Şahin, 2023; Topcu, 2022; Topcu ve ark., 2020; Şahin ve ark., 2023). Üretilen yeni kaolinit/PVA kompozitlerinin mikrodalga ekranlama etkinliği, belirli radar frekans bantları dahil olmak üzere 6-18 GHz frekans bandında EMI-SE ölçebilen Agilent Technologies marka N 5230A PNA serisi Ağ Analizörü cihazı ile ölçülmüştür (Golezani ve ark., 2022; Şahin ve ark., 2022).

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kaolinitin Hazırlanışı

Doğal kaolinit ile PVA tozu oksitlerin karışımı yöntemi ile kaolinit/PVA kompoziti halinde üretilmiştir. Ticari olarak elde edilen kaolinit (Aldrich) tozu yaklaşık 10 µm tane boyutuna sahiptir, yoğunluğu 2.6 gr/cm³ civarındadır. PVA (Merck) tozları ise beyaz renkte granüller halinde elde edilir ve yoğunluğu 1.25 gr/cm³ civarındadır. Doğal kaolinit buharlaşma kaybının önlenmesi amacıyla kapalı alümina sert pota içinde 450°C'de 4 saat süreyle kalsine edildi, bu numune kalsinasyon işlemi öncesinde ve sonrasında tartılmış ve ağırlık kontrolü sağlanmıştır. Kalsine edilen numune tozları akik sert havanda öğütülüp 2 MPa basınç altında tek eksenli hidrolik preste 10 mm çapında ve 1-2 mm kalınlıkta pelet halinde sinterleme işlemi öncesinde üretildi. Peletler halindeki doğal kaolinit mühürlü seramik potanın üzerine monte edilerek, uçucu türlerin kaybının azaltılması amacıyla 1150°C'de 4 saat kadar 300°C/saat ısıtma ve soğutma hızı ile yüksek sıcaklıklı fırında sinterlendi. Sinterlenen kaolinit numunesindeki, ayrıca PVA numunesindeki fazların karakterize edilmesi için, 2θ:10–70° aralığında Cu-Kα radyasonlu ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$), 1°/dk. taramalı hızı ile, D2 Phaser Bruker AXS marka X-ışını difraktometrisi (XRD) cihazı kullanıldı. X-ışını toz difraktometrisi ile ana yapıların kaolinit ve PVA olduğu belirlendi. Kaolinit/PVA kompozitlerin mikrodalga kalkanlama (ekranlama) etkinliği Agilent teknoloji marka N5230A PNA serisi ağ analizör (NA) cihazı ile geniş frekans bandında 6-18 GHz aralığında ölçülmüştür.

2.2. Kaolinit/PVA Kompozitlerin Hazırlanışı

Dayanıklı seramik agat havan içinde daha da ezilen ve toz haline getirilen PVA numunesi, sinterlenmiş kaolinit ile stokiometrik oranlarda karıştırılmıştır. Karışım kompozisyonu ağırlıkça sırasıyla (kaolinit - PVA) %80-20 ve %60-40 ayarlanmış ve plastik kaplar içine alınarak, kap içerisine 20 adet zirkonya bilye ve etanol konularak dönmeli değirmende 20 saat boyunca karıştırıldı. Karışım sonrası elde edilen bulamaçlar 50°C sıcaklık altında 24 saat kadar etüvde bekletilerek kurutuldu, belirli oranlarda alınan her bir karışım kompozisyonu etanol ile filtrelenerek yıkandı ve ince süzgeç kağıtlarda süzüldükten sonra elde edilen bulamaç vakum içine alınarak 24 saat boyunca 40°C'de bekletildi. Farklı oranlarda alınan yeni kaolinit/PVA (ağırlıkça %80-20, %60-40) kompozitleri elektromanyetik korunmanın nasıl etki ettiğinin belirlenmesi için üretilmiştir.

2.3. Epoksi-(Kaolinit/PVA) Kompozitlerin Hazırlanışı

Kaolinit/PVA bileşimi ve epoksi yeni kompozitlerin oluşturulması için belirli formda kalıplanarak oluşturuldu. Bileşim numunenin epoksi toza karışımı ağırlıkça 5:1 olarak belirlendi. Kalıplanma, sıcaklığı ayarlanabilir hidrolik pres cihazında 5 MPa basınç altında 60°C sıcaklık altında 45 dakika bekletilme ile gerçekleşmiştir. Kalkanlama etkinliğinin ölçümü için 1.5 cm'e 3 cm boyutlarında dikdörtgen şeklinde 1.4 mm kalınlığında kompozit numune üretilmiştir (Şekil 1). Kaolinit/PVA kompozitleri, geniş bant frekans bölgesinde koruma etkisi sağlamak amacıyla epoksi kullanılarak üretilmiş ve kalkanlama etkinliği testleri gerçekleştirilmiştir.

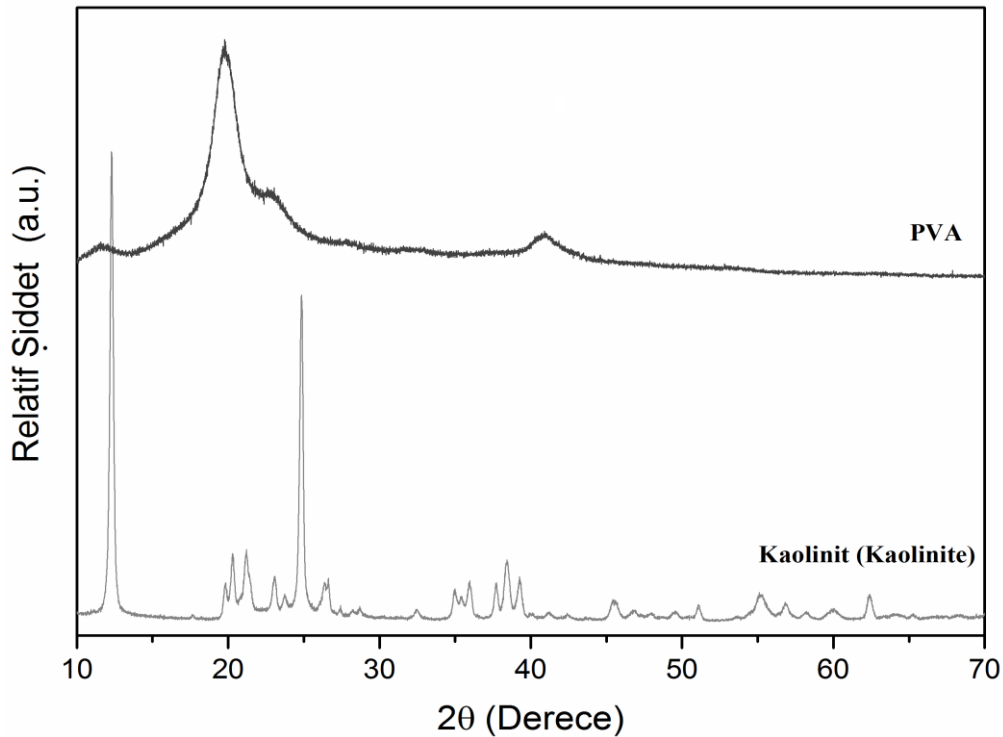


Şekil 1. Ölçüm Numuneleri, (Kaolinit/PVA)-Epoksi

3. ÖLÇÜMLER VE TARTIŞMA

3.1. (Kaolinit/PVA) XRD Analizi

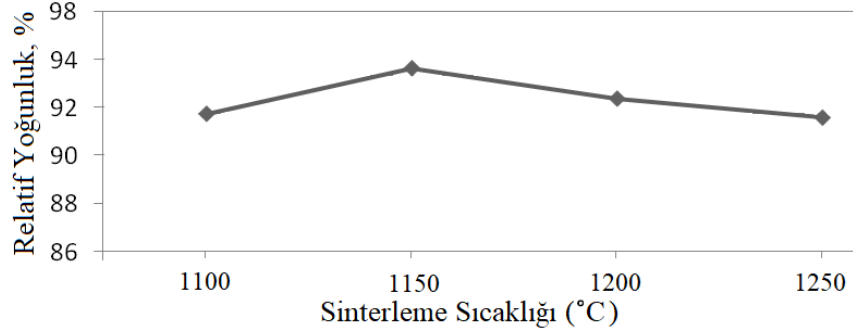
Kaolinit ve PVA'nın yapısal analizi için XRD spektroskopisi uygulandı. PVA ve 1150°C'de 4 saat sürede sinterlenen kaolinit'in X-ışını difraktometrisi çalışması, tek fazlı kaolinit ve PVA yapısını tespit etti (Şekil 2). XRD analizi sonucunda temel fazlar, kaolinit (PDF kart no: 00-005-0143), PVA (PDF kart no: 00-053-1847) olarak belirlenmiştir. Kaolinit'in tek fazlı yapı durumu, belirli bir kalsinasyon sıcaklığı ile olabilecek ara fazların ortadan kaldırılmasıyla ve uygun sinterlenme sıcaklığıyla elde edildi. Ölçüm sonuçlarına göre numunelerin kırınım pikleri ana fazdaki yapı ile uyum içindedir. XRD incelenmesine göre kaolinit ve PVA yapılarında ikincil fazlara rastlanılmamıştır.



Şekil 2. Kaolinit (1150°C'de sinterlenmiş) ve PVA için XRD paterni

3.2. Kaolinit'in Yoğunluk Ölçümleri

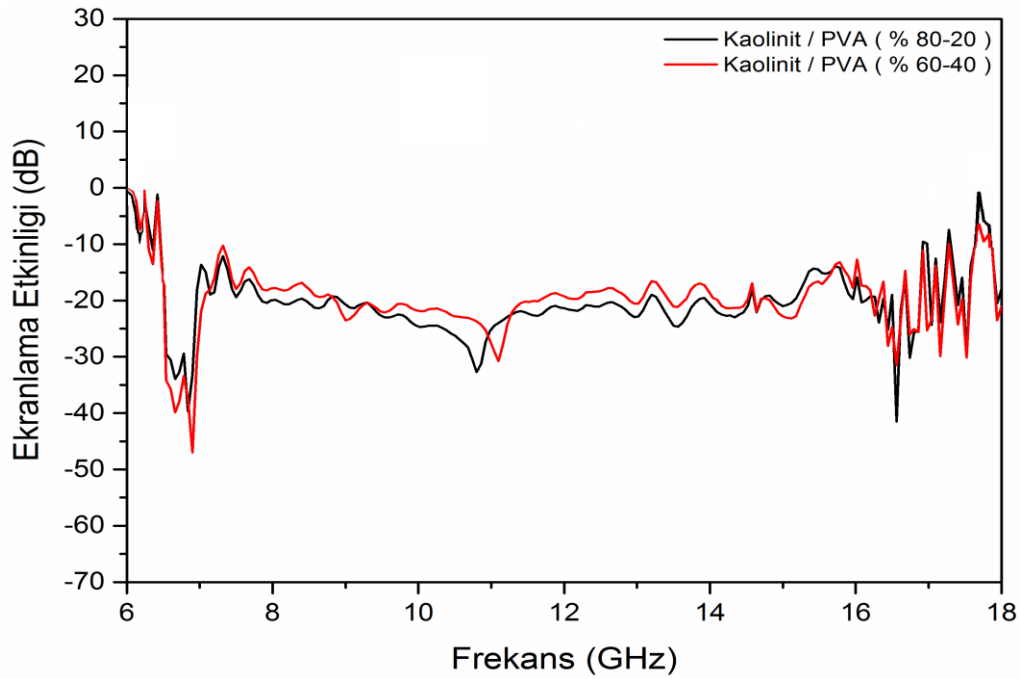
Sinterleme sonrası elde edilen kaolinit peletlerinin yoğunlukları arşimet yöntemi kullanılarak ölçüldü. Kaolinitler 1100°C'de yaklaşık %92 nispi yoğunluğa sahipken, 1150°C'de yoğunluk değeri %94'e ulaşmış ve daha sonra yoğunluk değerinde kademeli bir düşüş yaşanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Kaolinit'in Relatif Yoğunluklarının Sinterleme Sıcaklığı ile Değişimi

3.3. (Kaolinit/PVA) Kompozitlerin Ekranlama Etkinliği Ölçümleri

6-18 GHz geniş frekans bandında Şekil 4 (kaolinit/PVA)-epoksi kompozitlerin kalkanlama (ekranlama) etkinliğinin frekansa bağlı değişimini göstermektedir. Kalkanlama etkinliği yani SE (shielding effect) ölçümü N 5230A PNA seri ağ analizör aleti ile gerçekleştirildi. Pürüzsüz 1.4 mm kalınlıktaki dikdörtgen formdaki numuneler tekrar tekrar ölçülerek cihazın ölçümleri kontrol edilmiştir. Kaolinit/PVA kompozitleri arasında, kaolinit/PVA'nın (ağırlıkça %60-40) mikrodalga ekranlama etkinliği performansı diğer kaolinit/PVA (ağırlıkça %80-20) 'ya göre daha üstündü. Kaolinit/PVA (ağırlıkça %60-40) kompoziti en düşük değeri 6.92 GHz frekansta -47.02 dB olarak vermiştir. Bu kompozit sırasıyla 6.67, 11.09, 16.56, 17.53 GHz frekanslarında -40.14, -30.87, -31.8, -30.14 dB değerlerini göstermiştir. Ayrıca 6.48 ile 7.25 GHz, 7.36 ile 17.26 GHz arasındaki geniş frekans aralığı bölgelerinde -10 dB değeri altında kalkanlama etkisi göstermiştir. Buna ek olarak 6.51 ile 7.02 GHz, 9.73 ve 11.38 GHz, 16.42 ve 16.63 GHz frekans aralıkları bölgelerinde -20 dB değerinden daha az ekranlama etkinliği göstermiştir.



Şekil 4. (Kaolinit/PVA)- Epoksi Kompozitlerin Kalkanlama (ekranlama) Etkinliği Ölçümleri: Kaolinit-PVA (ağırlıkça %80-20) , Kaolinit-PVA (ağırlıkça %60-40)

Kaolinit miktarı yükseldiğinde ve PVA miktarı düştüğünde yani kaolinit/PVA (ağırlıkça %80-20) kompoziti test edildiğinde, en düşük -41.55 dB ekranlama etkinliği değeri 16.56 GHz frekansında yakalamıştır. Yine bu kompozit sırasıyla -39.88, -33.01, -30.14 dB değerlerini 6.83, 10.82, 17.53 GHz frekanslarında vermiştir. Ayrıca 6.51'den 16.92 GHz'e kadar olan geniş frekans bant bölgesinde -10 dB'den daha düşük kalkanlama etkinliği değeri göstermiştir. -20 dB'den daha az SE değerlerini ise 6.48 ile 6.92 GHz, 9.31 ile 12.29 GHz, 13.96 ile 14.51 GHz frekans aralıkları bölgelerinde vermiştir.

Ölçümlerde numune kalınlığı kritik öneme sahiptir, ayrıca kompozit malzemenin ölçülen SE değerleri geometriye ve oryantasyona bağlıdır. Elektromanyetik kalkanlayıcı malzemedeki iç yansımaların neden olduğu çoklu yansıma etkisi, EMI koruması üzerinde bir etkiye sahiptir ve malzemede çok sayıda büyük yüzey alanı veya arayüz bölgesi bulunduğu fark edilmektedir. Gözenekli yapıda olan bu kompozit malzeme, tahminen geniş spesifik yüzey alanlarına ve fazlaca iç tane sınırlarına sahiptir. Bu karakteristikler, EM dalga kalkanlama etkinliğini artırır, ayrıca malzemenin hafifliği de kompozit malzemenin değerli bir özelliğidir.

PVA ve kaolinit arasındaki çoklu arayüzler, arayüz polarizasyon varlığından dolayı gelişmiş elektromanyetik kalkanlama etkisini destekler. Mikrodalga kalkanlama etkisi aynı zamanda malzeme yüzeyindeki ışınlama empedansının uyumluluğu ile ilgilidir. PVA, kompozitlerin içeriğindeki malzemeler arasındaki iletimlerdeki uyum empedansını geliştirir. Bu arada, tutucu geometrisinin rezonans etkisi ve yansıma nedeniyle ölçüm sonuçlarında keskin ekranlama etkisi tepe noktaları ortaya çıkar. Kaolinit/PVA kompozitleri, geniş bant bölgesinde elektromanyetik dalga için iyi kalkanlama etkinliği gösterir. Yeni kompozitlerin mikrodalga kalkanlama etkinliği, malzemedeki PVA ve kaolinit konsantrasyonu ayarlanarak değiştirilebilir.

6. SONUÇ

Bu çalışma sonucunda (kaolinit-PVA) kompozitleri ağırlıkça sırasıyla %80-20 ve %60-40 ayarlanarak oksitlerin karışımı tekniği ile 1.4 mm kalınlığında üretilmiştir. Bu, bilinen (kaolinit-PVA) kompozitlerin geniş frekans bandındaki ilk kalkanlama etkinliği ölçümü araştırmasıdır. Kaolinit-PVA kompozitleri, mikrodalga ekranlama etkinliği ölçümleri, uygun maliyetli olmaları ve hazırlanma tekniği kolaylıkları nedenleriyle, ileri araştırmalar için de oldukça umut verici sonuçlar vermiştir. Epoksi-(kaolinit/PVA) kompozisyonu mikrodalga ekranlama etkinliği verimliliğini artırmak için, kompozit olarak üretilmiştir.

Tablo 1. Epoksi-(kaolinit/PVA) Kompozitlerinin Ekranlama Etkinliği Sonuçları

Örnek	SE (dB)	Frekans (GHz)
Kaolinit/PVA (%80-20)	-41.55	16.56
	-20	6.48-6.92, 9.31-12.29, 13.96-14.51
	-10	6.51-16.92
Kaolinit/PVA (%60-40)	-47.02	6.92
	-20	6.51-7.02, 9.73-11.38, 16.42-16.63
	-10	6.48-7.25, 7.36- 17.26

Kaolinit: PVA (ağırlıkça %60-40) kompoziti geniş frekans aralığı olarak, 7.36'dan 17.26 GHz'e kadar -10 dB'den düşük kalkanlama etkisi değeri göstermiştir. Ayrıca 6.51 ile 7.02 GHz, 9.73 ve 11.38 GHz, 16.42 ve 16.63 GHz frekans bantlarında -20 dB'den daha düşük ekranlama etkinliği değeri vermiştir. Kaolinit/PVA (ağırlıkça %80-20) kompoziti ise geniş frekans aralığı olarak 6.51'den 16.92 GHz'e kadar -10 dB'den daha az kalkanlama etkinliği değeri vermiştir. Ayrıca -20 dB'den daha az ekranlama etkinliği değerlerini ise 6.48 ile 6.92 GHz, 9.31 ile 12.29 GHz, 13.96 ile 14.51 GHz frekans aralığı bölgelerinde göstermiştir (Tablo 1).

Mikrodalga kalkanlama etkinliği kapasiteleri, daha geniş bileşen katkılarıyla incelenebilir. Bu kompozit geniş frekans bant aralığında mikrodalga kalkanlama etkinliği için umut vericidir. Mikrodalga ekranlama etkinliğinin daha iyi sonuçlar vermesi için kaolinit/PVA kompoziti kullanılmıştır. Gelecekte daha düşük frekanslarda ve farklı frekans bantlarında, bu kompozitin çeşitli katkı malzemeleriyle kalkanlama etkisi ve yansıma kaybı değerleri araştırılabilir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Bu çalışma yardımları asla unutulmayacak Salim Şahin ve Emsal Şahin, Prof. Dr. Ayhan Mergen anısına ithafendir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Anderson, R. L., Ratcliffe, I., Greenwell, H. C., Williams, P. A., Cliffe, S., Coveney, P. V. (2010). Clay swelling -A challenge in the oilfield. *Earth-Science Reviews*, 98(3-4), 201–216.
- Avloni, J., Ouyang, M., Florio, L., Henn, A. R., Sparavigna, A. (2007). Shielding effectiveness evaluation of metallized and polypyrrole-coated fabrics. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 20(3), 241-254.
- Castell, P., Cano, M., Maser, W. K., Benito, A. M. (2013). Combination of two dispersants as a valuable strategy to prepare improved poly(vinyl alcohol)/carbon nanotube composites. *Composites Science and Technology*, 80, 101-107.
- Chen, J., Min, F. F., Liu, L. Y., Liu, C. F. (2019). Mechanism research on surface hydration of kaolinite, insights from DFT and MD simulations. *Applied Surface Science*, 476, 6–15.
- Chung, D. D. L. (2000). Materials for electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 9, 34-354.
- Ding, M., Su, H., Yang, K., Li, Y., Li, F., Xue, B. (2021). Preparation and characterization of an aluminosilicate material with layer expansion structure. *Applied Clay Science*, 211, 106179.
- Golezani J. J., Kartal, M., Döken, B., Paker, S. (2022). Tribble-Band frequency selective surface design effective over oblique incidence angles for GSM system. *IETE Journal of Research*, 68(2), 1406-1410.
- Hamouni, M., Heddar, S., Ansri, A., et al. (2014). A comparative study of electromagnetic shielding efficiency of composites conducting polymers in near and far-fields. *Journal of Materials and Environmental Science*, 5(3), 945-950.
- He, G., Wang, C., Gao, J., Fan, L., Zhao, S., Chai, Y. (2019). Carboxymethyl chitosankaolinite composite hydrogel for efficient copper ions trapping. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(2), 102953.
- İkiz, Y. (2009). Elektro çekim yöntemi işlem parametrelerinin PVA nanolif morfolojisine etkileri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 363-369.
- Kang, X., Xia, Z., Chen, R., Liu, P., Yang, W. (2019). Effects of inorganic cations and organic polymers on the physicochemical properties and microfabrics of kaolinite suspensions. *Applied Clay Science*, 176, 38–48.
- Lalan, V., Ganesanpotti, S. (2020). Broadband electromagnetic response and enhanced microwave absorption in carbon black and magnetic Fe₃O₄ nanoparticles reinforced polyvinylidenfluoride composites. *Journal of Electronic Materials*, 49(3), 1666-1676.
- Liu, L., Bian, X. -M., Hou, Z. -L., Wang, C. -Y., Li, Z. S., Hu, H. D. et al. (2016). Electromagnetic response of magnetic graphene hybrid fillers and their evolutionary behaviors. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 27, 2760-2772.

- Meisak, D., Plyushch, A., Macutkevič, J., Grigalaitis, R., Sokal, A., Lapko, K. N., Selskis, A., Kuzhir, P., Banys, J. (2023). Effect of temperature on shielding efficiency of phosphate-bonded $\text{CoFe}_2\text{O}_4 - x\text{BaTiO}_3$ multiferroic composite ceramics in microwaves. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 1939-1948.
- Mallapragada, S. K., Peppas, N. (1996). Dissolution Mechanism of Semicrystalline Poly (vinyl alcohol) in Water. *Journal of Polymer Science Part B*, 34, 1339–1346.
- Orhan, E., Seven, E. (edt.) (2022). Teoriden Uygulamaya Fizik ve Matematik Alanında Akademik Çalışmalar. *İksad Publishing House*, Ankara.
- Panagopoulos, D. J., Margaritis, L. H. (2010). The effect of exposure duration on the biological activity of mobile telephony radiation. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 699(1-2), 17-22.
- Pivovar, B. S., Wang, Y., Cussler, E. L. (1999). Pervaporation membranaes in direct methanol fuel Cells. *Journal of Membrane Science*, 154(2), 155-162.
- Qasrawi, A. F., Hamersheh, A. A. (2022). Structural, optical and electrical properties of band-aligned $\text{CdBr}_2/\text{Au}/\text{Ga}_2\text{S}_3$ interfaces and their application as band filters suitable for 5G technologies. *Journal of Electronic Materials*, 51, 3693-3704.
- Santhosi, B. V. S. R. N., Ramji, K., Rao, N. B. R. M. (2020). Design and development of polymeric nanocomposite reinforced with grapheme for effective EMI shielding in X-band. *Physica B: Condensed Matter*, 586, 1-9.
- Shaikh, S. M. R., Nasser, M. S., Hussein, I., Benamor, A., Onaizi, S. A., Qiblawey, H. (2017). Influence of polyelectrolytes and other polymer complexes on the flocculation and rheological behaviors of clay minerals: a comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 187, 137–161.
- Shakeel, A., Kirichek, A., Chassagne, C. (2021). Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions. *Applied Clay Science*, 211, 106206.
- Shukla, V. (2020). Role of spin disorder in magnetic and EMI shielding properties of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{C}/\text{PPy}$ core/shell composites. *Journal of Material Science*, 55, 2826-2835.
- Şahin, E. İ, Emek, M., Ertug, B., Kartal, M. (2020). Electromagnetic shielding effectiveness of Colemanite/PANI/SiO₂ composites radar and wider frequency ranges. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 34-42.
- Şahin, E. İ. (2023). Electromagnetic shielding effectiveness of $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$:Chopped strands composites for wide frequency applications. *Journal of Ceramic Processing Research*, 24(1), 190-196.
- Şahin, E. İ., Emek, M., Ibrahim, Jamal Eldin F. M., Yumuşak, G., Kartal, M. (2023). Shielding effectiveness performance of polyaniline-NiFe₂O₄:Cu composites for sub-8 GHz applications. *Optical and Quantum Electronics*, 55, 500.
- Şahin, E. İ. (2019). *Katkılı NiFe₂O₄ Polimer Tabanlı Mikrodalga Yutucuların Frekans Seçici Malzeme Tasarımı* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, İstanbul.

- Şahin, E.İ. (2022). Microwave electromagnetic shielding effectiveness of ZnNb₂O₆-Chopped strands composites for radar and wideband (6.5-18 GHz) applications. *Lithuanian Journal of Physics*, 62(3), 161–170.
- Tariq, F., Shifa, M., Hasan, S. K., and Baloch, R. A. (2015). Hybrid nanocomposite material for EMI shielding in spacecrafts. *Advanced Materials Research*, 1101, 46-50.
- Ting, T. H., Yu, R. P., Jau, Y. N. (2011). Synthesis and microwave absorption characteristics of polyaniline/NiZn ferrite composites in 2–40 GHz. *Materials Chemistry and Physics*, 126, 364-368.
- Topcu, İ. (2020). Investigation of wear behavior of particle reinforced AL/B₄C composites under different sintering conditions. *Tehnicki Glasnik*, 14(1), 7-14.
- Topcu, İ. (2022). Sol-Jel yöntemi ile üretilen silica tabanlı hidrofobik aerogellerin karakterizasyonu özelliklerinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 45, 1-7.
- Topcu, İ., Ceylan, M., Yılmaz, E. B. (2020). Experimental investigation on mechanical properties of multi wall carbon nanotubes (MWCNT) reinforced aluminium metal matrix composites. *Journal of Ceramic Process Research*, 21(5), 596-601.
- Wang, X. C, Liu, Z. (2012). A new computation of shielding effectiveness of electromagnetic radiation shielding fabric. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 33, 177-186.
- Wang, L., Long, F., Chen, Y., Xiong, H., Rehman, S. U., Chang, J., Zhong, Z. (2022). Optimization of the microwave absorption properties of FeSiCr@Fe₂O₃ core-shell nanoparticles by controlling the thickness and crystallinity of Fe₂O₃ shell. *Journal of the American Ceramic Society*, 105, 4171-4179.
- Xing, Y. W., Xu, X. H., Gui, X. H., Cao, Y. J., Xu, M. D. (2017). Effect of kaolinite and montmorillonite on fine coal flotation. *Fuel*, 195, 284–289.
- Xu, Y., Liang, X., Xu, Y., Qin, X., Huang, Q., Wang, L., Sun, Y. (2017). Remediation of heavy metal-polluted agricultural soils using clay minerals: A review. *Pedosphere*, 27, 193–204.
- Zhang, W., Zhang, Z., Wang, X. (2009). Investigation on surface molecular conformations and pervaporation performance of the poly(vinyl alcohol) (PVA) membrane. *Journal of Colloid and Interface Science*, 333(1), 346–353.
- Zaroushani, V., Khavanin, A., Mortazavi, S., Jnonidi, A., Moieni, M., Javadzadeh, M. (2015). The role of a new electromagnetic shielding in reducing the microwave radiation for the x-band frequencies, *Iran Occupational Health*, 12(5), 83-99.



İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

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



Research Article / Araştırma Makalesi

REVISITING MODE CONVERSION BETWEEN TRANSMISSION LINES FOR WIDE-BAND MODELING OF DEFECTED GROUND STRUCTURES

KUSURLU TOPRAK YAPILARININ GENİŞ BANTLI MODELLENMESİ İÇİN
İLETİM HATLARI ARASINDAKİ MOD DÖNÜŞÜMÜNÜN TEKRAR İNCELENMESİ

Seyit Ahmet SİS¹

Fatih ÜSTÜNER²

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1245842>

Corresponding Author / Sorumlu Yazar
fustuner@ticaret.edu.tr

Received / Geliş Tarihi
01.02.2023

Accepted / Kabul Tarihi
24.04.2023

Abstract

This paper presents a wide-band transmission line model for defected ground structures (DGSs) based on a mode-conversion between microstrip- and slot-lines. The defects on the ground plane are modeled as short- or open-ended transmission lines (TLs) with slot-line characteristics. The transition between microstrip line and ground defect is modeled with interdependent voltage and current sources, of which the first one is placed in series with the microstrip line, and the latter in-shunt with the slot lines, respectively. A complete set of geometry-dependent analytical expressions for the ABCD parameter of a two-port microstrip line crossing over the defected structure is provided. Therefore, the proposed model can be readily integrated into computer-aided design programs. The model's accuracy is verified in various defect shapes by comparing its results with those from HFSS simulations and measurements.

Keywords: Defected ground structure (DGS), DGS Modeling, circuit model, microstrip line, mode-conversion, wide-band model, slot-line.

Öz

Bu makale, kusurlu toprak yapıları (DGS'ler) için mikroşerit ve yarıklı hatlar arasında mod dönüşümüne dayanan bir geniş bantlı iletim hattı modeli sunmaktadır. Toprak düzlemindeki kusurlar, yarıklı hat (slot-line) özelliklerine sahip kısa veya açık devre ile sonlandırılmış iletim hatları (İH'ler) olarak modellenmiştir. Mikroşerit hat ile topraklama kusuru arasındaki geçiş, sırasıyla ilki mikroşerit hat ile seri ve ikincisi yarıklı hatlarla şönt olarak yerleştirilmiş birbirine bağlı gerilim ve akım kaynakları ile modellenmiştir. Önerilen modelde kusurlu yapı üzerinden geçen iki portlu bir mikroşerit hattın tüm ABCD parametresi geometriye bağlı bir analitik ifadeler seti sağlanmaktadır. Bu da, önerilen modelin bilgisayar destekli tasarım programlarına kolayca entegre edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Modelin doğruluğu, model sonuçlarının HFSS simülasyonları ve ölçümlerinden alınan sonuçlarla karşılaştırılarak çeşitli kusur şekilleri için doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Devre modeli, geniş bant modeli, DGS modelleme, kusurlu toprak yapısı (DGS), mikroşerit hattı, mod dönüştürme, yarıklı hat.

¹Balıkesir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, Cagis Campus, Balıkesir, Türkiye. seyit.sis@balikesir.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-3740-2391.

²İstanbul Commerce University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, İstanbul, Türkiye. fustuner@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0001-9968-5123.

1. INTRODUCTION

Thanks to their compact size and ease of implementation, defected ground structures (DGSs) find their utilization in almost all types of microwave circuits including, amplifiers, filters, oscillators, and antennas (Jahan et al., 2020; Jong-Sik Lim et al., 2001; Khalid et al., 2020; Luo et al., 2018; Wei et al., 2017; Zhong et al., 2017). An accurate analytical model for the DGS is a major demand for microwave circuit designers; therefore, various circuit models are proposed (Ahn et al., 2001; Caloz et al., 2004; Challal et al., 2016; Chul-Soo Kim et al., 2002; Jun-Seok Park et al., 2002; Karmakar et al., 2006; Khandelwal et al., 2017; Knorr, 1974; Park et al., 2005; Sis et al., 2022; van Nechel et al., 2019; Woo et al., 2013). A parallel LC resonator produces the same electrical response as that of DGS (Ahn et al., 2001; Khandelwal et al., 2017; Woo et al., 2013). This simple model is useful for characterizing the DGS for a given electrical response; however, its narrowband response makes this model valid near the fundamental resonance frequency of the DGS. For wideband modeling, multiple cascaded LC circuits are proposed for representing higher-order resonances as well (van Nechel et al., 2019). Nevertheless, both models do not possess expressions relating the circuit geometry to its lumped element values; therefore, they are not quite useful for predicting the circuit's response in the initial design stage.

Other more complex lumped element models are also proposed in the literature (Jun-Seok Park et al., 2002; Karmakar et al., 2006; Khandelwal et al., 2017). The π -shaped lumped model in (Jun-Seok Park et al., n.d.) is a slightly modified version of the LC model with extra shunt-connected RC branches on both sides of the series-connected parallel LC resonator. These extra RC components provide the model to represent phase variation as well and yield more accurate results (Jun-Seok Park et al., 2002; Khandelwal et al., 2017). This model, however, also does not provide a direct relationship between the geometry of the circuit and the lumped element values. The quasi-static model (Karmakar et al., 2006) overcomes the aforementioned limitation by providing model parameters as a function of the physical dimensions of the DGS. Yet this model represents DGS near its fundamental resonance frequency and seems not to be accurate in wideband simulations.

The transmission line (TL)-based models are inherently suitable for wide-band modeling of distributed circuits; therefore various circuits are proposed for modeling DGSs (Caloz et al., 2004; Challal et al., 2016; Chul-Soo Kim et al., 2002; Das, 1993; Knorr, 1974; Park et al., 2005; Sis et al., 2022). In the TL-based models, the defects on the ground plane are usually represented by ideal TLs with slot-line characteristics (Caloz et al., 2004; Challal et al., 2016; Park et al., 2005), hence, these ideal TLs exhibit repeating resonance frequencies, which are observed in the frequency response of real DGS-based circuits. In these models, usually, the transition between the microstrip line and the defect is represented by an ideal transformer.

A TL model, based on a mode-conversion between the microstrip line and slot-line, was reported a while ago, even before the concept of DGS was not well-defined, for use in modeling signal integrity issues at the split ground planes (Haw-Jyh Liaw & Merkelo, 1996). In this mode-conversion-based transmission line (MCTL) model, the signal transition between microstrip and slot-line transmission lines is represented by interdependent voltage and current sources rather than transformers, which provide more physical insight than modeling through inductive coupling via transformers.

This paper revisits the mode conversion technique between transmission lines and proposes a wide band TL model for use in defected ground structures. Complete analytical expressions are derived as a function of the physical dimensions of DGS, making the model suitable to be readily utilized in a CAD software. The accuracy of the model is verified in various DGS shapes for wide frequency bands by comparing the model's results with those from HFSS (Ansys, H. F. S. S. "Ansys Inc.," 1998) simulations and measurements.

2. MODE CONVERSION-BASED TL MODEL FOR DGSs

A typical DGS structure and the schematic of the mode conversion-based transmission line (MCTL) model are shown in Fig. 1 (a) and (b), respectively. TL models for the microstrip line and slot-line on the ground defect are shown in two different dashed boxes and the signal in these two transmission line modes are converted to one another through dependent voltage and current sources as shown in Fig. 1 (b). The return current of the microstrip line on the ground plane is split into two halves by the defect and converted into the slot-line current, which is represented by the dependent current source I_{sl} in the model as shown in Fig. 1 (b).

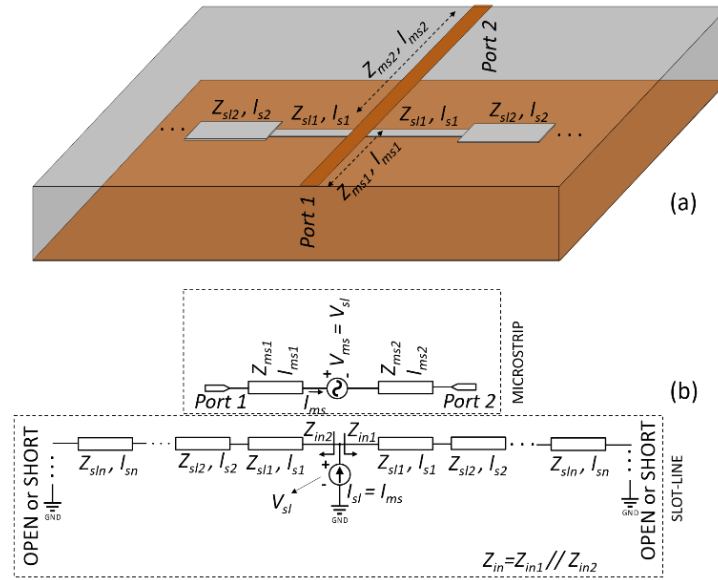


Figure 1. (a) A typical DGS structure and (b) schematic of the MCTL model for a typical DGS structure.

Since the I_{sl} is the return of the current passing through the microstrip line, I_{ms} , it is dependent and equal to the I_{ms} . The voltage seen across the slot-line, V_{sl} , is essentially the voltage seen on the dependent current source (I_{sl}) as seen in Fig 1 (b), and is formed as follows:

$$V_{sl} = I_{sl} \cdot Z_{in} \tag{1}$$

where Z_{in} is the parallel of the impedances seen towards both halves of the slot-line ($Z_{in} = Z_{in1} // Z_{in2}$). The V_{sl} rules the value of the dependent voltage source, V_{ms} , placed between the two halves of the microstrip line (Fig. 1 (b)). This way, the effect of introduced impedance due to the slot-line on the ground plane (Z_{in}) is simply reflected in the microstrip part of the model as shown in Fig. 1 (b). In the model, the Z_{ms1} , Z_{ms2} and l_{ms1} , l_{ms2} are characteristic impedances and lengths for the microstrip lines, respectively. Similarly, the Z_{sl1}, \dots, Z_{sln} , and l_{sl1}, \dots, l_{sln} are characteristic impedances and lengths for the slot lines, respectively. The impedances Z_{in1} and Z_{in2} are the input impedances of the cascaded ideal slot-line transmission lines on both sides of the dependent current source as shown in Fig. 1 (b). The ends of each half of slot lines may be short or open, respectively. Analytical expressions for Z_{in1} and Z_{in2} depend on the configuration of the cascaded slot-line structure. To illustrate this, four different configurations of slot-line defects on the ground plane are considered as shown in Fig. 2 (a)-(d).

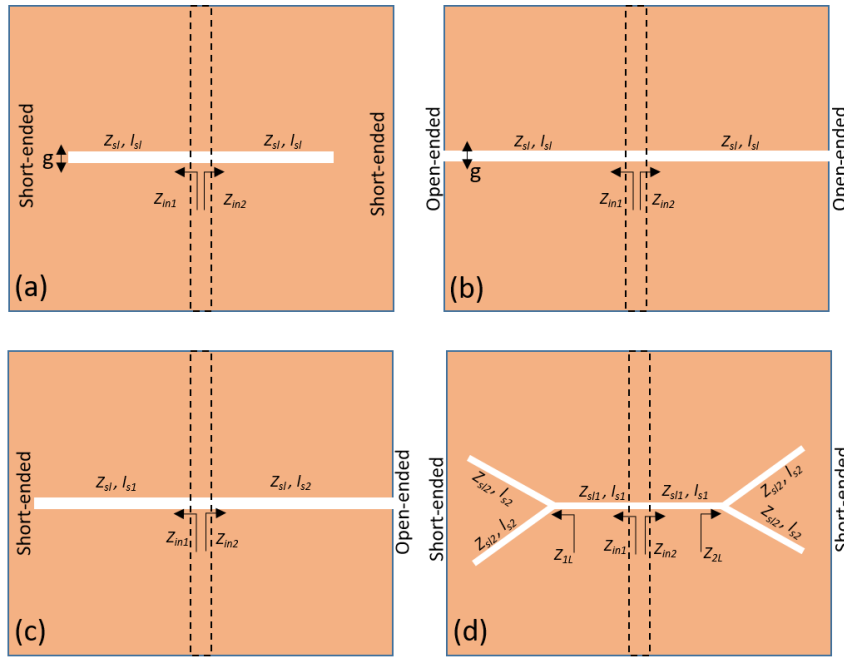


Figure 2. A top view of four different configurations of slot-line defects on the ground plane: (a), (b) a uniform slot line with constant width throughout the whole defect with short (configuration 1) and open (configuration 2) ends, respectively, (c) a uniform slot with asymmetric placement (configuration 3), and (d) a V-type branched slot line defect (configuration 4).

The first two configurations (Fig. 2 (a) and (b)) employ slots that are symmetrically divided under the microstrip line, and the slots are short- and open-ended in these configurations, respectively. The third configuration (Fig. 2 (c)) employs an asymmetrically divided slot in which one edge is ended with an open and the other edge is ended with a short circuit. The last configuration (Fig. 2 (d)) employs V-type branched slots, which are also symmetrically divided under the microstrip line. For the uniform slot structure with a constant width over the whole defect, as seen in Fig. 2 (a)-(b), the Z_{in1} and Z_{in2} are simply as follows for the short-ended slot line (Fig. 2 (a)):

$$Z_{in1,2} = jZ_{sl} \tan(\beta_{sl} l_{sl}) \quad (2)$$

and for the open-ended slot-line (Fig. 2 (b)):

$$Z_{in1,2} = -jZ_{sl} \cot(\beta_{sl} l_{sl}) \quad (3)$$

respectively (Poazar, 2011). In (2) and (3), the Z_{sl} , l_{sl} and β_{sl} are the characteristic impedance, length, and wave-constant for the slot structure, respectively. The characteristic impedance of a slot-line (Z_{sl}) as a function of its physical dimensions is as follows (Janaswamy & Schaubert, 1986) :

$$\begin{aligned}
Z_{sl} = & 60 + 3.69 \sin \left[\frac{(\varepsilon_r - 2.22)\pi}{2.36} \right] + 133.5 \ln(10\varepsilon_r) \sqrt{g / \lambda_0} \\
& + 2.81 [1 - 0.011\varepsilon_r (4.48 + \ln(\varepsilon_r))] (g / d) \ln(100d / \lambda_0) \\
& + 131.1 (1.028 - \ln(\varepsilon_r)) \sqrt{d / \lambda_0} \\
& + 12.48 (1 + 0.18 \ln(\varepsilon_r)) \frac{g / d}{\sqrt{\varepsilon_r - 2.06 + 0.85(g / d)^2}}
\end{aligned} \tag{4}$$

where ε_r , λ_0 , d , and g are the relative permittivity of the dielectric layer, the wavelength at free space, the thickness of the dielectric layer, and the width of the slot, respectively. The expression of Z_{sl} in (4) is valid for $2.22 < \varepsilon_r < 3.8$ and $0.0015 < g/\lambda_0 < 0.075$. The effective dielectric constant of the slot line (ε_{eff}) is as follows (Janaswamy & Schaubert, 1986):

$$\varepsilon_{eff} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_s} \right)^2 \tag{5}$$

where the slot-line wavelength (λ_s) is as follows:

$$\begin{aligned}
\lambda_s = & 1.045\lambda_0 - 0.365 \ln(\varepsilon_r) \lambda_0 + \left[\frac{6.3(g / d) \varepsilon_r^{0.945}}{238.64 + 100g / d} \right] \lambda_0 \\
- & \left[\left[0.148 - \frac{8.81(\varepsilon_r + 0.95)}{100\varepsilon_r} \right] \ln(d / \lambda_0) \right] \lambda_0
\end{aligned} \tag{6}$$

The Z_{in1} and Z_{in2} for the third configuration, shown in Fig. 2 (c), can be obtained using the transmission-line impedance equation as follows (Pozar, 2011):

$$Z_{in1} = jZ_{sl1} \tan(\beta_{sl1} l_{sl1}) \tag{7}$$

and

$$Z_{in2} = -jZ_{sl2} \cot(\beta_{sl2} l_{sl2}) \tag{8}$$

Since the short-ended slot lines on the V-type branches in the last configuration (Fig 2 (d)) are electrically-connected in series, the Z_{1L} and Z_{2L} are as follows:

$$Z_{1,2L} = 2jZ_{sl2} \tan(\beta_{sl2} l_{s2}) \tag{9}$$

Then the Z_{in1} and Z_{in2} for the fourth configuration, shown in Fig. 2 (d), can be obtained using the transmission-line impedance equation as follows (Pozar, 2011):

$$Z_{in1,2} = Z_{sl} \frac{Z_{1,2L} + jZ_{sl} \tan(\beta_{sl} l_{s1,2})}{Z_{sl} + jZ_{1,2L} \tan(\beta_{sl} l_{s1,2})} \tag{10}$$

Once the parallel impedances, Z_{in1} and Z_{in2} , are calculated, then the total input impedance seen towards the defect, Z_{in} , is as follows:

$$Z_{in} = Z_{in1} // Z_{in2} \quad (11)$$

The characteristic impedances of slot lines used in the above equations, Z_{sl1} and Z_{sl2} (see Fig 2 (c) and (d)), can also be calculated using (4). It should be noted that the above-given configurations in Fig. 2 are just four examples of many different defect shapes presented in the literature. The MCTL model discussed in this work is not limited to those four configurations but can be readily utilized for all defect configurations by applying the basic transmission-line theory. Once the input impedances of the defect (Z_{in}) is calculated for all four configurations using (2)-(10), then the two-port network parameters of the MCTL model in Fig. 1 (b) can be extracted by first treating the microstrip part of the model as three separate cascaded networks as shown in Fig. 3.

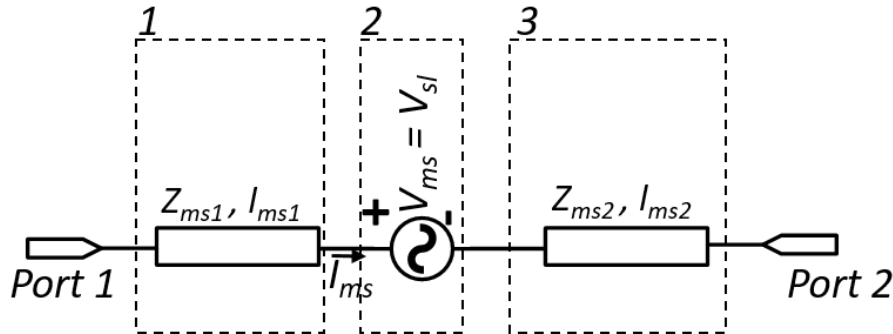


Figure 3. The three-cascaded sections of the microstrip part in the MCTL model.

The total ABCD parameter of this two-port network is the matrix multiplication of the ABCD parameters of each network as follows:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{ms1} l_{ms1}) & jZ_{ms1} \sin(\beta_{ms1} l_{ms1}) \\ j \frac{1}{Z_{ms1}} \sin(\beta_{ms1} l_{ms1}) & \cos(\beta_{ms1} l_{ms1}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & Z_{in} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\beta_{ms2} l_{ms2}) & jZ_{ms2} \sin(\beta_{ms2} l_{ms2}) \\ j \frac{1}{Z_{ms2}} \sin(\beta_{ms2} l_{ms2}) & \cos(\beta_{ms2} l_{ms2}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

where β_{ms1} and β_{ms2} are the wave constants for the microstrip transmission lines. The characteristic impedance of microstrip transmission-line sections, Z_{ms1} and Z_{ms2} , are calculated using the expressions given in (Pozar, 2011).

3. ELECTROMAGNETIC SIMULATIONS AND MEASUREMENT RESULTS

The MCTL model is verified by comparing its results with those from measurement and electromagnetic (EM) simulation results on four different circuit configurations, which are exactly the same as in Fig. 2. The physical dimensions of the realized circuits are detailed in Table I. A Rogers' 4003C ceramic laminate with a dielectric thickness, conductor thickness and relative permittivity (ϵ_r) of 0.508 mm, 35 μm and 3.55, respectively, is utilized as a substrate. In all these four configurations, microstrip line width is chosen as 1.096 mm to achieve a 50 Ω characteristic impedance for the aforementioned substrate properties. The EM simulations are performed in

high-frequency structure simulator (HFSS) and its' full two-port scattering parameters (S-parameters), for 50Ω port impedance, are obtained within a frequency range of 100 MHz – 6 GHz. The two-port scattering parameters (S-parameters) of the fabricated circuits are measured using an Agilent PNA series E8362B network analyser with a $50\text{-}\Omega$ system impedance.

Table 1. Physical Dimensions of the Circuits Used in Verification of the Model

Conf.	Slot width (g)	Slot Length (l_{sl})*	Microstrip line Width (W)	Microstrip line length (l_{ms})
1	0.5 mm	50 mm	1.096 mm	95.7 mm
2	0.5 mm	75 mm	1.096 mm	95.7 mm
3	0.5 mm	$l_{sl1}=35.5$ mm, $l_{sl2}=37.5$ mm	1.096 mm	47.6 mm
4	$g_1=0.5$ mm $g_2=0.5$ mm	$l_{sl1}=10.5$ mm, $l_{sl2}=10.5$ mm	1.096 mm	47.6 mm

* The defect length is twice the length of the slot length (l_{sl}) given in the Table. That is, the l_{sl} is defined as half of the total defect length (see Fig. 2).

Fig. 4 (a)-(d) shows a comparison of the MCTL model's results with those from EM simulations and measurement results for configurations 1-4, respectively. As seen in Fig. 4 (a) and (b), a very good agreement is achieved between these three results in frequency range of 100 MHz to 6 GHz. Since configuration 2 has a longer slot length, it creates larger number of resonance dips in measured frequency range (Fig. 4 (b)). Having a short-ended load for the slot line in configuration 1 causes a low-pass filter response at low frequencies (Fig. 4 (a)). On the other hand, having an open-ended load for the slot line in configuration 2 causes a transmission zero at DC (Fig. 4 (b)). Fig. 4 (c) shows comparison of the MCTL model's results with those from EM simulations and measurement results for configuration 3. As seen in Fig. 4 (c), the asymmetric placement and different ending of the slots on each side causes slight deviation between MCTL model, HFSS and simulation results. Finally, Fig. 4 (d) shows the same comparison for the fourth configuration. A good agreement is achieved between MCTL model, HFSS and simulation results.

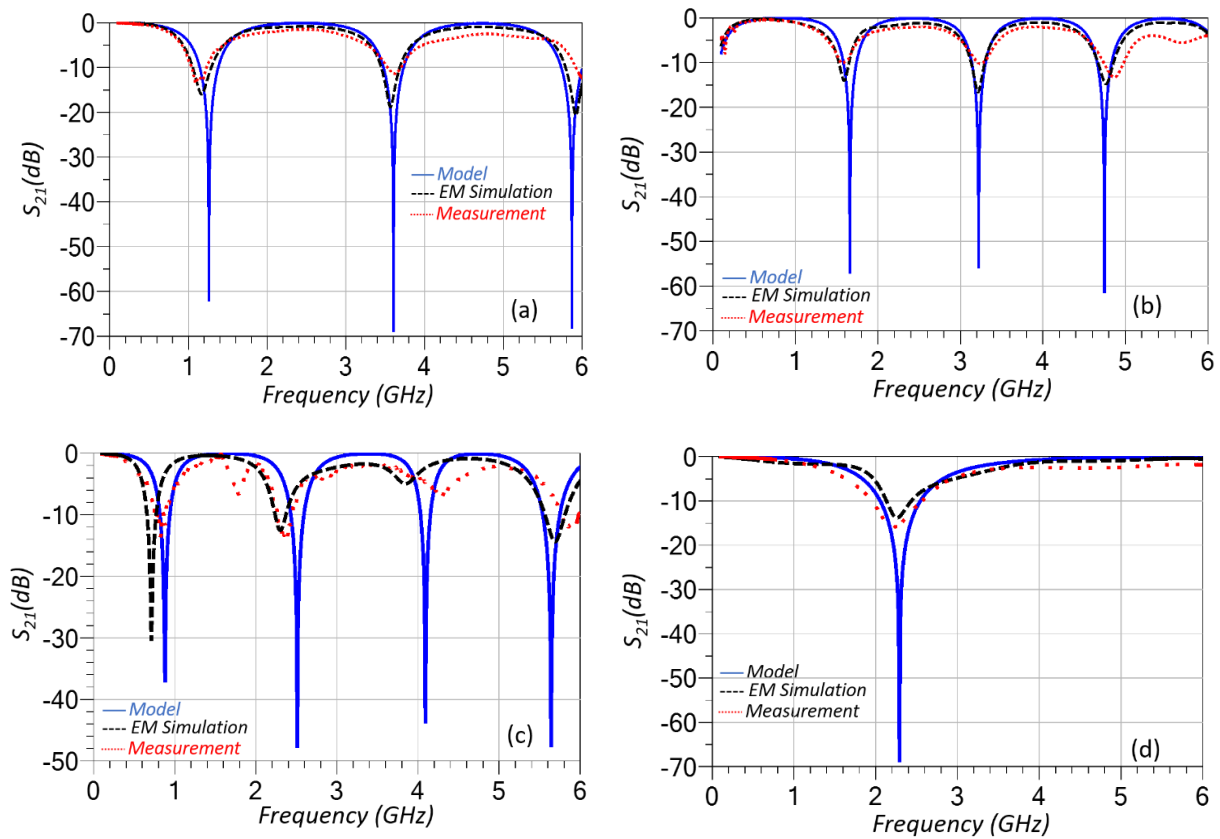


Figure 4. Comparison of the MCTL model's results with those from EM simulation and measurement for (a) configuration 1, (b) configuration 2, (c) configuration 3 and (d) configuration 4.

It should be noted that the MCTL model here is limited only to typical slot structures as in four configurations shown in Figure 2. In case of employing complex defects such as meandered slots exhibiting slow-wave effect, and sharp discontinuities, the MCTL model should be modified to include those effects.

4. CONCLUSION

In this paper, a wide-band MCTL model, originally utilized for modeling the discontinuities on the split ground planes is applied to defected ground structures successfully. The model's accuracy is verified through the HFSS simulations and measurement results of four circuits with different defect configurations. Complete analytical expressions for the two-port model presented in this work can be readily incorporated into an RF circuit simulator. Since the model is a distributed element model built on transmission line theory, any structural modifications on both the slot and the microstrip line can simply be incorporated into the modeling of the corresponding transmission line.

Contribution of The Authors

The authors confirm that they equally contributed to this paper.

Conflict of Interest

There is no conflict of interest between the authors.

Acknowledgement

This work was supported by the TÜBITAK/BILGEM and ROKETSAN A. S. under Grant 100152.12.11. The authors would like to thank Burak Demirdögen of ROKETSAN A.S. for supporting them in running HFSS simulations.

Statement of Research and Publication Ethics

Research and publication ethics were observed in the study.

REFERENCES

- Ahn, D., Park, J.-S., Kim, C.-S., Kim, J., Qian, Y., & Itoh, T. (2001). A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(1), 86–93. <https://doi.org/10.1109/22.899965>
- Ansys, (1998). H. F. S. S. “Ansys Inc.”
- Caloz, C., Okabe, H., Iwai, T., & Itoh, T. (2004). A simple and accurate model for microstrip structures with slotted ground plane. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14(3), 127–129. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2003.822564>
- Challal, M., Dehmas, M., Azrar, A., Aksas, R., & Trabelsi, M. (2016). Circuit modeling and EM simulation verification of DGS based low-pass filter employing transmission line model along with microstrip-slotline transitions. *MATEC Web of Conferences*, 52, 01003. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20165201003>
- Chul-Soo Kim, Jong-Sik Lim, Sangwook Nam, Kwang-Yong Kang, Jong-Im Park, Geun-Young Kim, & Dal Ahn. (2002, June, 2-7). *The equivalent circuit modeling of defected ground structure with spiral shape*. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.02CH37278), 2125–2128. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2002.1012290>
- Das, N. K. (1993). Generalized multiport reciprocity analysis of surface-to-surface transitions between multiple printed transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 41(6), 1164–1177. <https://doi.org/10.1109/22.238542>
- Haw-Jyh Liaw, & Merkelo, H. (1996, May, 28-31). *Signal integrity issues at split ground and power planes*. Proceedings 46th Electronic Components and Technology Conference, 752–755. <https://doi.org/10.1109/ECTC.1996.550491>
- Jahan, N., Baichuan, C., Barakat, A., & Pokharel, R. K. (2020). Utilization of Multi-Resonant Defected Ground Structure Resonators in the Oscillator Feedback for Phase Noise Reduction of K-Band VCOs in 0.18- μm CMOS Technology. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 67(4), 1115–1125. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2020.2965007>
- Janaswamy, R., & Schaubert, D. H. (1986). Characteristic Impedance of a Wide Slotline on Low-Permittivity Substrates (Short Paper). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 34(8), 900–902. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1986.1133465>
- Jong-Sik Lim, Ho-Sup Kim, Jun-Seek Park, Dal Ahn, & Sangwook Nam. (2001). A power amplifier with efficiency improved using defected ground structure. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 11(4), 170–172. <https://doi.org/10.1109/7260.916333>

- Jun-Seok Park, Jae-Ho Kim, Jong-Hun Lee, Sang-Hyuk Kim, & Sung-Ho Myung. (2002, June, 02-07). *A novel equivalent circuit and modeling method for defected ground structure and its application to optimization of a DGS lowpass filter*. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest* (Cat. No.02CH37278), 417–420. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2002.1011644>
- Karmakar, N. C., Roy, S. M., & Balbin, I. (2006). Quasi-static modeling of defected ground structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(5), 2160–2168. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.873633>
- Khalid, M., Iffat Naqvi, S., Hussain, N., Rahman, M., Fawad, Mirjavadi, S. S., Khan, M. J., & Amin, Y. (2020). 4-Port MIMO Antenna with Defected Ground Structure for 5G Millimeter Wave Applications. *Electronics*, 9(1), 71. <https://doi.org/10.3390/electronics9010071>
- Khandelwal, M. K., Kanaujia, B. K., & Kumar, S. (2017). Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2017, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2017/2018527>
- Knorr, J. B. (1974). Slot-Line Transitions (Short Papers). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 22(5), 548–554. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1974.1128278>
- Luo, J., He, J., Wang, H., Chang, S., Huang, Q., & Yu, X.-P. (2018). A 28 GHz LNA using defected ground structure for 5G application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(5), 1067–1072. <https://doi.org/10.1002/mop.31112>
- Park, J., Park, K., Chang, S., & Ahn, D. (2005, February, 13-15). A New Equivalent Transmission Line Modeling of Dumbbell Type Defected Ground Structure. *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Electronics, Hardware, Wireless and Optical Communications*. Salzburg Austria, 1-5.
- Pozar, D. M. (2011). *Microwave Engineering* (4th ed.). John Wiley & Sons, USA.
- Sis, S. A., Ustuner, F., & Demirel, E. (2022). EMI Reducing Interdigital Slot on Reference Planes of the PCBs. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 64(1), 219–229. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2021.3083654>
- Van Nechel, E., Ferranti, F., Rolain, Y., & Lataire, J. (2019, June, 18-21). A Wide-Band Equivalent Circuit Model for Single Slot Defected Ground Structures. *IEEE 23rd Workshop on Signal and Power Integrity (SPI)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/SaPIW.2019.8781651>
- Wei, K., Li, J. Y., Wang, L., Xu, R., & Xing, Z. J. (2017). A new technique to design circularly polarized microstrip antenna by fractal defected ground structure. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 65(7), 3721–3725. <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2700226>
- Woo, D.-J., Lee, T.-K., & Lee, J. W. (2013). Equivalent circuit model for a simple slot-shaped DGS microstrip line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 23(9), 447–449. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2013.2274037>
- Zhong, Y., Yang, Y., Zhu, X., Dutkiewicz, E., Shum, K. M., & Xue, Q. (2017). An on-chip bandpass filter using a broadside-coupled meander line resonator with a defected-ground structure. *IEEE Electron Device Letters*, 38(5), 626–629. <https://doi.org/10.1109/LED.2017.2690283>



Derleme Makale / Review Article

**SIFIR GÜVEN AĞ ERİŞİM MİMARİSİNDE KULLANICI
GÜVENLİĞİNİN SAĞLANMASI***

**USER IN ZERO TRUST NETWORK ACCESS ARCHITECTURE
ENSURING SECURITY**

Abbas BULUT¹

Muhammed Ali AYDIN²

Abdül Halim ZAIM³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1102276>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
abbasbulut@yahoo.com

Geliş Tarihi / Received
12.04.2022

Kabul Tarihi / Accepted
13.10.2022

Öz

Sıfır güven ağ güvenlik modeli, geleneksel ağ modeline ciddi bir alternatif haline gelmiştir. Bilindiği gibi ağ yapıları ilk kurulduğunda asıl amaç güvenliği sağlamak değildi. İnternetin yaygınlaşması, paylaşılan bilgi miktarının artması ve kolay ulaşılabilir olması bilgi güvenliği ile ilgili endişeleri hayatımıza sokmuştur. Sıfır güven bu noktada devreye girmiş ve "asla güvenme-her zaman doğrula" kavramıyla yepyeni bir anlayış getirmiştir. Kısa sürede kabul gören bu anlayış, şirketlerin giderek ağ yapılarını segmentlere ayırmalarına ve entegre ürünler geliştirmelerine neden olmuştur. Sıfır güven güvenlik modeli Kullanıcı, Veri, Cihaz, Uygulama ve Ağ trafiği bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenlerden en önemlisi, kullanıcı olarak tanımlanan uç nokta cihazlarıdır. Çünkü siber saldırı bir uç noktada başlar ve hedefi bir uç noktada biter. Bu bağlamda makale, sıfır güven mimarisinde uç noktanın önemini ve Sıfır güven güvenlik platformunu son kullanıcıya genişletmenin faydalarını vurgulayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kullanıcı doğrulanması yetkilendirilmesi, kullanıcı erişim güvenliği, sıfır güven mimarisi, sıfır güven ağ mimarisi.

Abstract

The zero trust network security model has become a serious alternative to the traditional network model. As it is known, when the network structures were first established, providing security was not the main goal. The widespread use of the Internet, the increase in the amount of shared information, and easy accessibility have brought concerns about information security into our lives. Zero trust stepped in at this point and brought a brand new understanding with the concept of "never trust - Always verify". This understanding, which was accepted in a short time, gradually caused companies to segment their network structures and develop integrated products. Zero trust security model consists of User, Data, Device, Application and Network traffic components. The most important of these components is the end point devices, which are described as users. Because a cyber attack starts at an endpoint and its target ends at an endpoint. In this context, the article will emphasize the importance of the endpoint in zero trust architecture, and the benefits of extending the Zero trust security platform to the end user.

Keywords: Endpoint authentication and authorization, endpoint secure access, zero trust architecture, zero trust network architecture.

*Bu yayın Abbas BULUT isimli öğrencinin İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Siber Güvenlik Programındaki Lisansüstü tezinden üretilmiştir.

¹İstanbul Ticaret Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye. abbasbulut@yahoo.com, Orcid.org/0000-0003-2880-7861.

²İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. aydinali@iuc.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-1846-6090.

³İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. azaim@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-0233-064X.

1. GİRİŞ

Geleneksel ağ mimarileri tasarlanırken asıl başarılması gereken, verilerin kaynaktan hedefe doğru “en hızlı nasıl ulaşabiliriz ?” konusu idi. Bu sebeple ağ sistemlerine yapılan yatırımlar veri iletim altyapısındaki değişime ve gelişime yapılan yatırımlardı. Bu yapılar ilk kuruldukları yıllarda nispeten izole sistemlerdi. Ağ kavramı yeni olduğu için dışardan gelebilecek saldırı tehditleri yoktu. Zaman içinde gelişen bilişim güvenliği kavramı sayesinde geleneksel ağ yapıları “güvenilen alan” (Trust) ve “güvenilmeyen alan” (Untrust) olarak iki kısma ayrıldı. Atak vektörleri yönü, dışardan içeri olacak şekilde tanımlandı. Güvenlik duvarı (Firewall) cihazlarının devreye girmesi ile iki kısma ayrılan ağ yapılarına, DMZ (De-Militarized Zone) alanı kavramı eklenmiş oldu. Bu şekilde dış dünyaya hizmet verebilecek sunucularımız oluşturuldu. Gelişimlere paralel olarak, merkez-ofis arasında IPsec VPN (IP Security Virtual Private Network), mobil kullanıcılar için SSL VPN (Secure Socket Layer Virtual Private Network) bağlantıları ile hibrid yapılar oluşturmaya başlandı. Bulut tabanlı (Cloud base) altyapı hizmetlerin gelişmesinden sonra sunucuların, uygulamaların dahi nerede olduğu bilinmeyen sanal yapılara kavuşuldu. Nesnelerin İnterneti (IoT-Internet of Things) teknolojisinin gelişmesi çok daha birbirine bağlı ve bağımlı olan sistemleri oluşturdu. Bu devasa yapıyı sadece açık ağ sistemleri gibi düşünmek değil kapalı ağların da dahil olduğu işlevsel teknoloji (Operational Technology- OT) yapısı olarak da düşünmek gerekmektedir.

Günümüz pandemi şartları sebebiyle, dijital dönüşüm planları yapan firmaların tüm süreçlerini hızlandırmış oldu. İlerleyen zamanlarda tamamlamayı düşündükleri yapısal değişim daha erken gerçekleşti. Mevcut yapının değişimi doğal olarak, siber güvenlik yaklaşımını da değiştirmiş oldu. Dijitalleşme düzenine hızlı geçiş sürecinde, değişen 3 konu var.

1. Tam olarak uzaktan çalışma olmasa bile, artık hibrit yapılarda çalışmaya başlandı. Bu durum cihazların görünebilirliğinin azalmasına ve bağlanılan cihazların ne olduğunun tam olarak bilinmeyen bir yapıya dönüşmesine sebep oldu.
2. Firmaların bu süreçte kendi özel bulut (private cloud) yapılarını tamamen genel bulut (public cloud) yapısına geçirilme işlemi hızlanmış oldu. Her ne kadar bulut (cloud) yapısı ölçeklenebilirlik ve işlem gücü gibi olanaklarını sağlama kolaylığı vermese de, kullanılan yazılımların ne kadar güvenli olduğu konusu, yazılımlar içinde ek bilgi kaynağı olarak kullanılan üçüncü parti uygulamaların, hatta konteyner sistemlerinin güvenliği konusu tartışılmaya başlandı. Bu uygulamaların ve uygulamalar içinde barındırılan platformların (Amazon Web Services, Microsoft Azure v.s) güvenliği söz konusu olmaya başladı.
3. Hızla gelen dijitalleşme ortamında telemetri verileri inanılmaz bir şekilde artmaya başladı. Çok fazla yerden daha çok log gelmeye başladı. Doğal olarak bu logların korelasyona tabi tutulup saldırıların analitik incelenmesi, saldırıya dakikalar içinde cevap verilebilme zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Bu kadar log verisinin yönetilmesi için yapay zeka uygulamalarının kullanımı zorunlu olmuştur.

Ağ tasarımlarında güvenlik kavramı düşünülmediği için, katmanlarının arasına farklı güvenlik seviyelerinin kontrollerini yapan cihazlar yerleştirildi. Bu şekilde tüm yapının güvenliğinin sağlanılmaya çalışıldığını görüyoruz. Bu cihazların çoğu zaman birbirinden farklı üretici ürünleri olması, kontrollerinin tek bir noktadan yapılması zorlaştırmıştır. Bu sebeple, bilişim dünyasında (uygulama, yazılım, donanım) ve ağ altyapısındaki gelişmeler ile siber saldırı vektörlerinin çok daha karmaşık, sofistike olduğu bir noktaya gelmiş bulunmaktayız.

Sıfır güven mimarisi (Zero Trust Architecture) aslında tam bu noktada yeni güvenlik stratejisi olarak devreye girmiştir. Bilinenin aksine, atak vektörlerinin içerden dışarı doğru tanımlanmasını önermektedir. Bu yaklaşım satın alınabilecek bir ürün ya da servis değildir. Fakat ürün içine ya da yönetilen servislere katma değer olarak eklenebilecek bir mekanizmadır. Daha önceden bilinen

kavram olmasına rağmen, değişik yapılara uygulanabilmesi ile hızlı bir şekilde kabul gören bir strateji olmuştur. Şirketlerin giderek ağ yapılarını segmentlere ayırmalarına, birbiri ile entegre ürünler geliştirmelerine neden olmuştur.

Sıfır güven mimarisi ile yaşanan gelişmeler değişik yapılara entegre olan yeni kavramlar ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Sıfır güven mimarisini bir şemsiye olarak düşünüldüğünde, sıfır güven ağ mimarisi (Zero Trust Network Architecture) bu yapılanmalardan birini teşkil etmektedir. Temel kavramlar olarak benzer olsalar bile, sıfır güven mimarisi ile sıfır güven ağ mimarisi aynı kavramlar değildir.

Sıfır güven ağ mimarisine bakıldığında genel olarak ana bileşenler,

- erişim yapan/yapılan cihaz tanımlanması ve kontrolü (device identification and control)
- erişim yapan kullanıcı tanımlanması ve kontrolü (user identification and control)
- profil kontrol (posture)
- uygulama geçiş kontrolleri (application transaction controls)

Bu çalışmada, genel olarak sıfır güven ağ mimarisine dayalı kullanıcı erişim kontrollerinin nasıl yapıldığı incelenmiştir. Mevcut kullanılan bazı uygulamaların orta ölçekte firmalarda test edilmiş sonuçları da paylaşılmıştır.

Sıfır güven ağ mimarisi kullanıcı güvenliği noktasında, 3 temel husus üzerine inşa edilmiştir.

- asla güvenme - her zaman doğrula
- en az ayrıcalığı uygula
- her zaman ihlal varmış gibi düşün.

Stratejinin doğası gereği, veri girişlerinin yapıldığı alanlarda bir kontrol noktası oluşturulması esastır. Dolayısıyla gerek lokal üzerinden, gerek uzak erişimle merkezi veri alışverişi yapan tüm kullanıcı erişimleri kontrol edilmelidir. Güvenlik zincirindeki en zayıf halka insandır. Organize-odaklı siber saldırıların çoğu zaman bir uç noktada (end point) başlayıp yine bir uç noktada sonlanması sebebiyle, kullanıcı insiyatifini en aza indirip kontrollerini sağlıklı bir şekilde yapmak gerekir. Tecrübelerle dayanarak ifade edilebilir ki, kullanıcı makinelerinde çoğu zaman antivirüs yazılımları ya da makine bazlı çalışan güvenlik duvarı yazılımları bulunmaktadır. Bu yazılımlar gelişen tehditlere karşı çoğu zaman etkisiz kalmaktadırlar.

Şekil 1. üzerinde, Ponemon Institute tarafından, 2020 yılı sonu itibariyle yayınlanan Uç Birim Güvenlik Riskleri” (*Endpoint Security Risks Status*) raporunda veri ihlallerinin sebep olduğu kullanıcılara olan etkileri görülebilir.



Şekil 1. Son Kullanıcıya Yönelik Saldırı Vektörleri

Bu alandaki çalışmalar incelendiğinde, mevcut yapılardan sıfır güven ağ mimarisine geçerken en önemli bileşenlerden olan kullanıcı kavramının değişim süreci incelenmemiş. Ayrıca sıfır güven ağ mimarisine geçtikten sonraki kullanıcı entegrasyonu ile çalışmaların sayısı çok fazla değildir. Yapılan çalışmaların içeriğinin genel olarak teorik olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın iki amacı vardır. Birincisi literatürde yer almayan sıfır güven ağ mimarisi içerisinde, son kullanıcı güvenliğini sağlamaya yönelik boşluğu doldurmak, bir diğeri ise mevcut son kullanıcı ürünlerinin incelenmesi sonucu elde edilen verilerin yapay zeka destekli uygulamaların geliştirilmesinde model önermektir. Bazı ticari uygulama testleri birçok kuruluşların son kullanıcı bilgisayarlarında denenmiştir.

Bu çalışma devamında, Bölüm 2'de literatür araştırmalarına yer verilmiş, literatür değerlendirmeleri yapılmıştır. Bölüm 3 'de çalışmada kullanılan materyal ve metotların ne olduğu tartışılmıştır. Bölüm 4 kullanılan metotlarla ilgili kullanıcı makinelerinde yapılan testlerin analizi yer almıştır. Bölüm 5 de ise sonuç ve öneriler kısmı bulunmaktadır.

2. LİTERATÜR

Literatürde sıfır güven mimarisi, sıfır güven ağ mimarisinin bileşenlerinin kimlik doğrulaması, değişik cihazlar üzerinde uygulanışı ve cihaz doğrulamasının sağlanması ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda aktarılmıştır.

Eidle ve ark. (2017), sıfır güven mimarisi ile organize olacak şekilde, TCP sessionlarının arasında TAC -Transport Access Control - denilen TCP connection ilk paketinde bir token gönderilmesi konusunu incelemiştir. Samaniego ve ark. (2018), tarafından çalışmada IoT cihazlarındaki artışın beraberinde getirdiği güvenlik risklerini ele alınmış, özellikle kimlik doğrulama alanında Blockchain yapısının kullanılmasını incelemiştir. Vanickis ve ark. (2020), gelişen IoT teknolojilerine paralel olarak IIoT (Industrial Internet of Things) sistemlerindeki gelişmelere değinmiş, bu tür ağlar için bir risk analizin belirlenememesi en büyük handikap olarak görülmüş, sıfır güven mimarisinin mikro segmentasyon özelliği ile risk analizi raporlarının çıkarılmasını incelemiştir. Chen ve ark. (2021), 5G nin sahip olduğu yüksek bant genişliği, düşük gecikme ve aynı anda birden fazla işlem yapabilme kapasitesinde olduğu için medikal alanda kullanılabilmesini incelemiş ayrıca 5g uyumlu akıllı medikal çözümlerde hasta ve hastane verilerinin lokal olarak on-prem den çıkıp bulut ortamına yönelmesi ile sıfır güven mimarisinden yararlanılması ihtiyacı doğurmasına değinilmiştir. Liu ve ark. (2020) usb ya da benzeri cihazlarla taşına bilginin daha güvenli olduğu düşünülmesinin dezavantajları anlatılarak, Elastik Stack açık

kaynak kodlu yazılım üzerinde sıfır güven modellemesinin yapılması ile birlikte biyometrik özelliklerin kimlik doğrulaması için kullanılabilmesi incelenmiştir. Tian ve Song (2021) sıfır güven mimarisinin “asla güvenme, her zaman doğru” mottosuna ek olarak, “yazmak yok, okumak yok” kavramı ile birleştirip, veri gizliliğinin, bütünlüğünün gerçekleştirilmesini incelemiştir. Bu yöntemin birtakım eksiklikleri olduğu en önemli eksikliğin ise sistemlere ilk güven değerinin 100 olarak verilmesi yani güvenilmesidir. Sonrasında davranışlara göre risk skorunun yeniden belirlenmesi, belli bir seviye indirilmesi sağlansa bile başlangıç değerinin başlı başına risk olduğu görülmüştür. Yang ve ark. (2021) son dönemlerde popüler bir konu olan IHA (insansız hava araçları)’nın sahtecilik saldırılarına karşı zayıf olduğu, kullanıcı tabanlı kimlik denetimleri gibi klasik doğrulama metodlarının kullanılması da klasik güvenlik zafiyetlerine açık olduğu ifade edilmiştir. IHA üzerinde bir ağ geçidinin kurulması ve IHA’lardaki diğer ağ geçitleri, yer istasyonundaki ağ geçitleri ile sıfır güven mimarisini kullanarak haberleşmesi incelenmiştir. Bu şekilde güvenilir kimliği, bu sistemin çalışabilmesinin garantisi olacağı düşünülmektedir. D’Silva & Ambawade (2021). Sıfır güven mimarisinin tüm OSI katmanları boyunca incelenip avantaj ve dezavantajlarını ifade edilmiş olup, sıfır güven mimarisinin temel bileşenlerinden olan mikro segmentasyonun kubernetes ortamlarına uygulanışı incelenmiştir. Patil ve ark. (2020) dağıtık yapılarda paylaşılan kullanıcı verilerinin izlenmesi, her bir düğüme erişen ve erişim isteği gönderen kullanıcıların kimlik doğrulamasının yapılması için sıfır güven mekanizması uygulanması incelenmiştir. Zhang ve ark. (2021) karma (mesh) topolojilerde güvenlik açısından tehlikeler oluşturmaya başladığına değinilmiştir. Ağların mikro segmentasyonu ile yürüyen sistemin ana parçalarını farklı farklı tutma yeteneği sağlaması incelenmiştir. Yang ve ark. (2018), Büyük veri (big data) teknolojisinin birçok güvenlik riskini beraber getirmekte olduğuna vurgu yapıp, sıfır güven mimarisinin güvenlik mekanizması ile big data platformlarının üzerinde kullanıcı kimlik doğrulamalarının tanımlanması incelenmiştir. DeCusatis ve ark.(2016), TCP iletişiminde paket isteğine kimlik doğrulama tokenlarının yerleştirilerek ilk paket doğrulaması ile sıfır güven mimarisinin etkisini daha da arttıracaklarını öngörmüşlerdir. Bunun hem kurumsal bilgi hareketinde hem de bulut tabanlı uygulamalarda güvenlik kavramını derinlemesine incelemişlerdir. Amaral ve ark. (2021), uzun yıllardır bilinen “Siber Tedarik Zinciri (Cyber Supply Chain)” saldırılarına alınması gereken güvenlik önlemlerinin sıfır güven mimarisi ile nasıl entegre olması gerektiğini incelenmiştir. McCarry ve ark. (2021), daha önce test edilmemiş çoklu-bulut (Multi Cloud) ortamlarda sıfır güven mekanizmasının performansını kontrol edebilmek için Istio yazılımını kullanılmasını incelemişlerdir. Xiaojan ve ark.(2021), IoT (Internet of Things - nesnelerin interneti)’ler üzerinde devamlı kimlik kontrolünün yapılması, Erişim kontrol listelerinin tanımlanması konusunda sıfır güven mimarisinden faydalanılması incelenmiştir. Rocha ve ark. (2021), gelişmiş kalıcı tehditler (APT-Advanced Persistent Threats) saldırılarının çok uzun süreli, emek ve bilgi gerektiren bir saldırı tipi olduğundan bahsedilmiş, APT saldırılarına karşı sıfır güven mimarisi kullanılması incelenmiştir. Dhar ve ark. (2021), IoT yapısının heterojen nitelikte olduğu için mevcut ağ güvenliği araçlarının yetersizliği ve IoT cihazlarına iletilen verileri tehdit eden çok sayıda atak vektörü olduğundan bahsedilmiştir. Bu şekilde yapılanma içerisinde sıfır güven ve block-zincir (block-chain) kullanımı ile IoT cihazlarının güvenliğini sağlanması incelenmiştir. Bertino & Brancik (2021), sıfır güven tasarımındaki zorluklarından özellikle mevcut yapıların geçişinin kolay olmadığı incelenerek analiz çalışmasının dikkatli yapılması konusu vurgulanmıştır. Zhang & Jiang (2021), Internet servis sağlayıcı (ISP) olan firmaların bulut teknolojisini kullanarak SaaS (Software As a Service) olarak sağladığı bu yapıların sıfır güven mimarisi ile kullanılması incelenmiştir. Bicakci ve ark.(2021), USB dongle gibi external cihazların veri taşınmasındaki risk olduğunu, kimlik doğrulamanın tercih edilmesi ve sıfır güven üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ali ve ark. (2021) medikal sistemler için yazılan uygulamaların 5G teknolojisi ile entegre olurken kullanıcı-cihaz, cihaz-cihaz doğrulaması için sıfır güven mimarisi kullanılması incelenmiştir. Koudai ve ark. (2021) Sıfır güven mimarisinin, çevre ağ yaklaşımının önüne geçip, kuruluş kaynaklarının korunması, yetkilendirme kararlarının dinamik verilip, dinamik erişim listeleri ile entegrasyonu incelenmiştir. Meng ve ark. (2022) tarafından incelenen ve China Communications Magazine dergisinde Ağustos 2022 yılında yayınlanan yazı içeriğinde,

Sıfır güven mimarisine farklı bir açıdan bakmayı düşünmüşlerdir. Yazarlara göre, sıfır güven mimarisinde cihazdan cihaza, kullanıcıdan kullanıcıya da uygulamaya sürekli kimlik doğrulama aşamasında bir güven yetkilisine güvenir. (Güven yetkilisi burada cihaz ya da kullanıcıların sertifika ile haberleştiği veri ile kullanıcı arasında bir katman olup, tüm session bazlı bağlantıların üzerinden geçtiği düğüm ya da sunucu olabilir). “Bu güven yetkilisinin güvenilirliğinden nasıl emin olabiliriz?” sorusuna cevap aranmıştır. Sıfır güven mimarisi içinde bu otoritenin yerine blok-zinciri (block-chain)’nin merkezîyetçi olmayan yapısının kullanılmasını incelemişlerdir. Hosney ve ark. (2022) sıfır güven mimarisindeki kimlik doğrulama işleminin BT yöneticilerine getirdiği iş yükünün yapay zeka algoritmaları kullanılarak çözülmesini incelemiştir. Chen ve ark. (2021) Bilgi işlem altyapılarında merkezi olmayan bir kimlik yönetiminin önemine vurgu yapılarak, blok-zinciri (block-chain) mimari çözümünü incelemiştir. Bunun için her nesneye bağımsız ve eşsiz kimlik numarası verilmesi tek yönlü akış şemaları incelenmiştir. Dobrowski & Pacyna (2022), Kuperberg (2020), kimlik yönetim sisteminin dağıtık yapısından dolayı yönetilmesinin zor olacağı belirtilmiştir. Tek noktadan kontrol için blok-zinciri (block-chain) tabanlı sistemlerin kullanılması incelenmişlerdir. Kang ve ark. (2022). Tüm erişim listelerinin ve erişim ile ilgili sertifikaların korunduğu ana sunucunun güvenliğini sağlamak için sıfır güven ile entegre edilmesini incelemiştir. Wang ve ark.(2019) tarafından bulut sistemlerinde kullanıcı kimlik doğrulaması için Ethereum Blok zinciri tabanlı kullanımını incelenmiştir. Wu ve ark. (2021), erişim kontrolleri ve kimlik yönetiminin fonksiyonlarının sıfır güven mimarisi içinde entegre çalıştırılabilmesi incelenmişlerdir. Srour ve ark. (2006) eşlerarası ağ (P2P- peer to peer network)’ların merkezi bir yapısının olmaması sebebiyle oluşan güvenlik açıklıklarına, kendi geliştirdikleri itibar (reputation) servis algoritmasını incelemişlerdir. Fang & Guan (2022) iOS terminallerinin, sıfır güven mimarisini kullanarak, kurumsal kaynaklara erişimi incelenmiştir. Wu ve ark. (2021), Güç Nesnelerin İnterneti (Power Internet of Things) terminallerinin ihtiyaç duyduğu, kullanıcı doğrulaması (user authentication), cihaz doğrulaması (equipment trust), uygulama bütünlüğü (application integrity), veri akışı (flow baselines) işlemlerinin sıfır güven mimarisi ile entegrasyonu incelemişlerdir. Chen ve ark. (2021) Mobil internet hizmetlerinin karşılaştığı güvenlik sorunları incelenmiş, farklı perspektiflerden sıfır güven mimarisi ile entegrasyonu araştırılmıştır. Araştırmalar sonucu ortaya atılan çalışabilirlik alanı (framework) tablolarının gelişen ataklara karşı güncellenerek sıfır güven mimarisine uyarlanmasının ilerleyen çalışmalarda öncü olacağı belirtilmiştir. Syed ve ark. (2022). Sıfır güven mimarisini farklı senaryolar üzerine derinlemesine incelenmiştir. Mikro segmentasyon, kullanıcı ve cihaz doğrulaması konuları ayrıntılı incelenmiştir. Sheikh ve ark. (2021), mevcut kurumsal altyapı ve uygulamaların bulut ortamına taşınması ile sıfır güven mimarisinin bu yapıya uygunluğu incelenmişlerdir. Mikro segmentasyonun ağ ortamlarına uygulanmasını gerek sunucular arasında gerekse uygulamalar arasında geçiş sağlanırken etiketleme (tagged) metodunu incelemişlerdir. Sanal makineler üzerinde yaptıkları testlerde erişim sağlanan sunucu ya da uygulamanın karşılıklı beyaz liste (whitelist) eklenmesi ile ilgili bir çalışma yapılmış, kısmen başarı sağlanmış, nihai durum için gelecek çalışmalara vurgu yapılmıştır.

2.1. Literatür Taraması Sonuçları ve Literatürdeki Boşlukları

Literatür içerisinde çoğunlukla sıfır güven mimarisi/sıfır güven ağ mimarisini mevcut bir teknolojinin yanında o teknolojinin etkisini ve güvenilirliğini arttırmak için kullanılmıştır. Bulut ortamları için nadir olarak ara katman (middleware) yazılımlarını kullanmak zorunda kalınmış uygulamaların güvenliğini sağlama konuları işlenmiştir. Mevcut ağ sisteminin sıfır güven ağ mimarisine dönüştürülmesinde, analiz ve uzun süreli test çalışmalarının önemine vurgu yapılmıştır. Literatür taraması sonucunda, literatür boşlukları;

- Çalışmaların çoğunda popüler olan nesnelerin interneti (Internet of Things-IoT) geliştirilmesi için kullanılmıştır. Verinin tüm erişilebilir olduğu noktada bu çalışmalar yapılmalıdır.

- Çalışmalarda genel olarak sıfır güven ağ mimarisinin saf olarak kullanılmasına değinilmemiştir. Var olan sistemlere entegre olup sistemin güvenliği geliştirmek temel amaç şeklinde düşünülmüştür.
- Organizasyon ve özellikle bu araştırmanın konusu olan kullanıcı ile ilgili yönler araştırmacılar tarafında ihmal edilmiştir. (Aynı zamanda bunun uygulayıcılar tarafından da ihmal edildiği piyasa şartlarında gözlemlenmiştir.)

3. MATERYAL VE METODOLOJİ

Sıfır güven mimarisinin fonksiyonel olarak eyleme dönüşebilmesi için mevcut ağ mimarisinin yeni güvenlik stratejisine göre düzenlenmesi ya da sıfırdan başlangıç için bileşenlerin belirlenmesi gerekmektedir. Ortam olarak hazırlandıktan sonra güvenlik stratejisine uygun kullanıcı erişim güvenliği için metotlara değinilecektir.

3.1. Sıfır Güven Ağ Mimarisine Geçiş Hazırlıkları

Sıfır güven ağ tabanlı bir güvenlik sistemi kurmanın birden fazla yolu vardır.(Chambel, 2020)

- Kuruluş içerisinde kritik aktörlerin belirlenmesi:
Sıfır güven ağ mimarisini hayata geçirebilmek için ilk yapılacak işlemlerden biri, kuruluşun faaliyet göstermesi için kurumsal konular hakkında bilgi sahibi olunması gerekmektedir. Geliştiriciler veya sistem yöneticileri gibi özel ayrıcalıklara sahip kullanıcılar, öznitelikler veya roller atanırken ek incelemeye ihtiyaç duyar. Pek çok eski güvenlik mimarisinde, bu hesapların tüm kurumsal kaynaklara erişim için kapsamlı izni olabilir. Sıfır güven mimarisi, geliştiricilere ve yöneticilere, erişim davranışı modellerini tanımlamak, günlükleri denetim eylemlerini kullanırken yeterli esnekliğe sahip olmalarına izin vermelidir.
- Kuruluşun sahip olduğu varlıkları tanımlama:
Sıfır güven ağ mimarisinin temel gereksinimlerinden biri ağ ortamında bulunan ya da ağ ortamına bağlanan cihazları tanımlama ve yönetme becerisidir. Kurumsal varlıkları yönetme yeteneği, sıfır güven mimarisinin başarılı bir şekilde konumlandırılmasının anahtarıdır. Buna donanım bileşenleri (ör. dizüstü bilgisayarlar, telefonlar, IoT cihazları) ve dijital varlıklar (ör. kullanıcı hesapları, uygulamalar, dijital sertifikalar) dahildir. Kuruluşa ait altyapıda bulunan, yeni keşfedilen varlıkları hızlı bir şekilde tanımlama, kategorize etme ve değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. Bu şekilde sıfır güven mekanizması kurumsal varlıklardan oluşan bir veri tabanını kataloglamanın ve sürdürmenin ötesine geçer. Aynı zamanda konfigürasyon yönetimi ve izlemeyi de içerir. Bir varlığın mevcut durumunu gözlemleyebilme yeteneği, erişim taleplerini değerlendirme sürecinin bir parçasıdır.

Kurumsal olmayan varlıklar ve kurumun sahip olduğu “gölge BT” olabildiğince kataloglanmalıdır. Bu bilgiler görülebilenleri (örneğin, MAC adresi, ağ konumu) ve yönetici veri girişi ile artırılmış her şeyi içerebilir. Elde edilen veriler sadece erişim kararları için değil, aynı zamanda kuruluş tarafından izleme günlüğü için de kullanılır. Gölge BT, bu kaynakların kuruluşa ait olması, ancak diğer kaynaklar gibi yönetilmemesi nedeniyle özel bir sorun teşkil eder. Belirli sıfır güven mimarisi yaklaşımları (esas olarak ağ tabanlı), bilinmeyen bu yüzden erişim politikalarına dahil edilemeyen sistemler yüzünden uygulanamaz hale gelebilir, çünkü sonradan tespit edilen her bileşenin mimariyi baştan düzenlemeye sebep olması kaosa sebep olabilir.

- Temel süreçlerin belirlenmesi ve yürütme süreci ile ilgili risklerin belirlenmesi: İş süreçleri, hangi kaynak erişim taleplerinin verildiği ve reddedildiğini bildirmelidir. Kesintiler büyük olasılıkla tüm organizasyonu olumsuz etkilemeyeceğinden, kuruluş sıfır güven mimarisine ilk geçiş için düşük riskli bir iş süreciyle başlamak isteyebilir. Yeterli deneyim kazandığında, daha kritik iş süreçleri aday olabilir. Bulut tabanlı kaynakları kullanan veya uzaktaki çalışanlar tarafından kullanılan iş süreçleri genellikle sıfır güven mimarisine geçiş için en iyi adaylardır. Kurumsal müşteriler, kurumsal çevreyi (perimeter) buluta yansıtmak veya müşterileri bir VPN aracılığıyla kurumsal ağa getirmek yerine, bulut hizmetlerini doğrudan talep edebilir. Planlayıcılar ayrıca, belirli bir iş süreci için sıfır güven mimarisini uygularken ortaya çıkabilecek performans, kullanıcı deneyimi ve olası artan iş akışı kırılganlığındaki potansiyeli de dikkate almalıdır

3.2 Sıfır Güven Mimarisi İçin Politikalar Oluşturmak

Sıfır güven mimarisine geçiş için iş akışını belirleme süreci birkaç faktöre bağlıdır:

- kuruluş için sürecin önemi,
- etkilenen denek grubu,
- iş akışı için kullanılan kaynakların mevcut durumu.

Varlık veya iş akışına yönelik riske dayalı varlık veya iş akışının değeri, NIST Risk Yönetimi Çerçevesi kullanılarak değerlendirilebilir.

Varlık veya iş akışı tanımlandıktan sonra, kullanılan tüm üst akış kaynaklarını (ör. Kimlik yönetim sistemleri, veri tabanları, mikro hizmetler), alt akış kaynakları (ör. Günlük kaydı, güvenlik izleme) ve varlıkları (ör. Varlık isimleri, hizmet hesapları) belirleyin veya iş akışından etkilenir. Daha sonra, işletme yöneticilerinin aday iş sürecinde kullanılan kaynaklar için kriter setini (kriterlere dayalı teknik yardım kullanılıyorsa) veya güven düzeyi ağırlıklarını (puan temelli teknik yardım kullanılıyorsa) belirlemeleri gerekir. Yöneticilerin değerlendirme aşamasında bu kriterleri göz önünde tutmaları gerekebilir. Politikaların etkili olmasını ancak kaynaklara erişimin tamamen engellememesini sağlamak gereklidir.

3.2.1. İlk kurulum aşaması ve izlenmesi

Kurumsal firmanın iş akışı ve SGM bileşenleri seçildikten sonra, ilk dağıtım başlayabilir. Kuruluş yöneticileri, seçilen bileşenleri kullanarak geliştirilen politikaları uygulamalıdır, ancak ilk başta bir gözlem ve izleme modunda çalışmak isteyebilirler. İlk yinelemelerinde çok az kurumsal politika seti tamamlanmıştır: önemli kullanıcı hesaplarının (ör. Yönetici hesapları) ihtiyaç duydukları kaynaklara erişimi reddedilebilir veya kendilerine atanmış tüm erişim ayrıcalıklarına ihtiyaç duymayabilir.

Yeni iş akışı, politikaların etkili ve uygulanabilir olduğundan emin olmak için bir süre yalnızca raporlama modunda çalıştırılabilir. Bu aynı zamanda kuruluşun temel varlık ve kaynak erişim talepleri, davranışları ve iletişim modellerini anlamasına da olanak tanır. Yalnızca raporlama, çoğu istek için erişimin verilmesi gerektiği anlamına gelir ve bağlantıların günlükleri ve izleri, geliştirilen ilk politika ile karşılaştırılmalıdır. Zorunlu tutulur ve günlüğe kaydedilir, ancak ilk dağıtımdan sonra erişim ilkeleri, iş akışının gerçek etkileşimlerinden veri toplamak için daha esnek olmalıdır. İş akışı için temel aktivite modelleri oluşturulduktan sonra, anormal davranış daha kolay tanımlanabilir. Daha yumuşak bir nitelikte çalışmak mümkün değilse, kurumsal ağ operatörleri günlükleri yakından izlemeli ve operasyonel deneyime dayalı olarak erişim politikalarını değiştirmeye hazırlıklı olmalıdır.

3.2.2. Mikro segmentasyon:

Geleneksel ağ yapılarında kullanıcıları ayırmak için vlan yapıları kullanılır. Bunlar her ne kadar bir güvenlik sınırı oluşturmak için yapılandırılabilir, aslında teknolojik olarak bunu yapamazlar. Kötü niyetli bir saldırganın vlanlar arasında hareket etmesini önleyemezler. Mikro segmentasyon, ağ üzerinde kullanılan tüm kaynakları erişim kontrolü, güvenlik, şifreleme, paket yönlendirme gibi uygulamalarla birleştirilerek küçük düğümlere ayırmaktır (Rose ve ark., 2022). Sonuçta, her biri kendi güvenlik politikalarına ve erişim izinlerine sahip olan, erişimi yönetmede esnekliğe izin veren ve şirketlerin ağ içindeki bir tehdidin kontrolsüz yayılımını engellemesini sağlayan çok sayıda ayrılmış segmentasyon oluşur. Bu şekilde uyum ve performans sorunları çözülmüş olur (Rose ve ark., 2022).

3.2.3. Paralel anahtarlama altyapıları

Geleneksel anahtarlama altyapıları doğal olarak ağ üzerinde bir darboğazdır. Bu sebeple güvenli ve verimli ağlar oluşturmak konusunda bize kısıtlı bir yapı sunarlar. Bugün arkasında çok önemli fabric yapıları bulunan Birleşik Anahtarlar (Unified Switch) kullanılmaktadır. Ama asıl sorun anahtarlama altyapısının bilgiyi paralel ve çok çekirdekli (multi core) yapıda işleyememesidir. Zira işlenen tüm paketlerin yapısı, hedefleri, öncelikleri farklı olacaktır.

Modern dizüstü bilgisayarlarında işletim sistemi merkezli çok çekirdekli yapılar kullandığını biliyoruz. Bu aynı zamanda birden fazla işlemi (process) dağıtık olarak aynı anda yapabilmeyi sağlar. Bu model core anahtarı birden fazla fabric yapıya bölerek verinin paralel işlenmesini amacıyla modern ağlarda da kullanılabilir. Böyle bir yapıda maliyet açısından daha ucuz core yapılar kurularak her bir işlem için mikro anahtarlama yapıları oluşturabilmeye ihtiyaç var.

3.2.4. Tek noktadan merkezi yönetim

Merkezi cihaz yönetimi “komut satırı” günlerinde çok pratik ve mümkün değildi. Şu anda kullanılan genel çözüm çok sayıda bileşenleri tek bir console ekranından yönetmek şeklindedir. Fakat çoğu zaman hedefe bakılmaksızın tüm trafiklerin bir yöne doğru yansıtılması (mirroring-span) trafik sıkışıklığına sebep olabilir. Olması gereken ise bileşen altyapısındaki yönetim arayüzü performansını arttırmaktır. Bunun için uç noktalarda ağ öğelerinin her birinin bir her olayı kaydedip analiz edebilmesi ve gerekli trafiği ya da olması gereken logları merkezi bir yapıya yönlendirmesi önem arz etmektedir. Log üreten cihaz en yakın noktada olmak esastır.

3.2.5. Sıfır güven ağ mimarisini genişletmek

Yeterince güven kazandığında ve iş akışı politika belirlendiğinde, kuruluş istikrarlı operasyonel aşamaya girer. Ağ ve varlıklar hala izlenir ve trafik günlüğe kaydedilir. Ancak yanıtlar ve politika değişiklikleri şiddetli olmaması gerektiğinden daha düşük bir tempoda yapılır. İlgili kaynakların ve süreçlerin konuları ve paydaşları da operasyonları iyileştirmek için geri bildirim sağlamalıdır. Bu aşamada, kurumsal yöneticiler sıfır güven mimarisinin dağıtımının bir sonraki aşamasını planlamaya başlayabilir. İş akışı ve çözüm seti belirlenmeli ve ilk politikalar geliştirilmelidir. Bununla birlikte, iş akışında bir değişiklik olursa, çalışan mimarinin yeniden değerlendirilmesi gerekir. Yeni cihazlar, yazılımda yapılan önemli güncellemeler ve organizasyon yapısındaki değişiklikler gibi sistemdeki imzalı değişiklikler, iş akışı, ilke değişikliklerine neden olabilir. Gerçekte, işin bir kısmının zaten yapılmış olduğu varsayımı ile tüm süreç yeniden değerlendirilmelidir.

3.3. Metodoloji

Sıfır güven ağ mimarisi, sıfır güven güvenlik modelinin metodolojisidir. Bu modelin uygulanabilir, görülebilir halidir. Çalışmada işlenen sıfır güven ağ mimarisinde kullanıcı güvenliğinin sağlanması konusu iki metodolojik yaklaşımla ele alınmıştır. İlk adımda sıfır güven ağ mimarisindeki kullanıcı tabanlı erişim politikaları için kipling metodu anlatılmıştır. İkinci adımda ise Forrester sıfır güven ağ metodu anlatılmıştır.

3.3.1. Kipling metodolojisi

Kipling yöntemi, herhangi bir problemi bulmak adına Ne?, Nerede?, Ne zaman?, Nasıl?, Neden?, Kim? sorularını sorarak çözüm hakkında fikirlerimizin genişlemesine yardımcı olur. Bu metod güvenlik çerçevesi (security framework) olarak düşünüldüğünde erişim politikaların belirlenmesinde kullanılabilir. Kipling methodunun 5 adım modellemesini incelersek,

1. Korumanız gereken alanları belirlenmesi: atak arayüzleri (attack surfaces) devamlı gelişmekte ve genişlemektedir. Bu sebeple kuruluş için kritik verilerin neler olduğunu belirlemek, neyi korumamız gerektiğini bilmek açısından önemlidir.
2. Veri trafiği akışlarının haritalanması: kritik verilerin birbirleriyle girdiği etkileşim, ağ boyunca hareket etme şekli (şifreli/şifresiz) belirlenmelidir. Bu şekilde uygulamalar için etkili erişim politikaları yazılabilir.
3. Sıfır güven mimarisinin oluşturulması: kritik verileri belirleme ve veri akışlarının ilişkileri tanımlandıktan sonra, altyapı olarak gelişmiş güvenlik duvarları kullanılarak mikro segmentasyon alanları oluşturulabilir. (mikro segmentasyon, korunacak verilerin güvenli alanlar oluşturularak diğer verilerden ayrılmasıdır).
4. Erişim listelerinin oluşturulması: Bu metod üzerinde bir beyaz liste (white list) oluşturulması gerekiyor. Bu liste metodolojinin sorularına verilen cevaplarla oluşturulacaktır.
 - a. Kim – Kaynağa kim erişecek?
 - b. Ne - Korunması gereken alan (protect surface) içinde bulunan kaynaklara erişim için kullanılan uygulamalar nedir?
 - c. Ne zaman - Kaynak erişimine ne zaman erişim sağlanacak?
 - d. Nerede - gönderilen verinin hedefi nedir?
 - e. Neden - veri paketi korunan alana neden erişmek istiyor?
 - f. Nasıl – Korunan alana erişen uygulamalar bunu nasıl yapıyorlar?
5. Tüm yapının izlenmesi ve bakımının yapılması: ilk 4 adımda uygulanan mimarinin performans değerlendirilmesinin yapılması gerekir. İzleme sırasında elde edilen bazı bulgular sürece dahil edilip bakımı yapılmalıdır.

3.3.2. Forrester sıfır güven ağ metodolojisi

Kullanıcı adı ve şifre bilgisi, mevcut kullanıcıyı tanımlamaktan öte bazı kontroller gerektirir. Bu sebeple her kullanıcı bağlantı girişiminin yeniden değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu metodoloji de sıfır güven mimarisinde kullanıcıların yapılandırılmasında dikkat edilecek hususlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yetkili kullanıcılarınızı sadece uygulama seviyesinde değil, ağ seviyesinde de kontrol etmek gereklidir.
- Temel olarak single-sign-on yöntemi ile yetkili kullanıcı girişlerini tercih edebilirsiniz. Ortamda bulunan AAA (Authentication, Authorization, Accounting) sunucu ile entegre şekilde çalışabilirsiniz. Bu birden fazla kimlik bilgisi riskini ortadan kaldırır.
- Kullanıcı erişimlerinizi Multifactor authentication metodlarıyla güçlendirin. Çok faktörlü kimlik doğrulama (Multi Factor Authentication –MFA) katmanı kritik uygulamalarınıza

erişirken ekstra güvenlik sağlar. Özellikle dış dünyadan bağlanan kullanıcılar veya tanımlı olmayan cihazlarla bağlantı kurulduğunda iyi bir seçenek olabilir.

- Kullanıcı yetkilerini daraltmayı deneyebilirsiniz. Kaynak kullanımında etkinliği azaltmayacak şekilde kuralların belirlenmesi, belli bir zaman diliminde bağlanma, belli bir coğrafi konumdan bağlanabilme ya da erişim türünü belirlenmesi sağlanabilir. (kablolu, kablosuz SSL VPN vb.) Bu kontrollerin tümüne “ortam denetleme” (context inspection) adı verilir.
- Anomali tespiti yapılabilir. Bunun için çeşitli loglama/SIEM çözümleri ile de çalışılabilir. Bu şekilde kullanıcının bağlanmasına izin verilmediği durum, başarısız kullanıcı girişimleri takip edilmelidir.
- Sıfır Güven Ağ mimarisinde en önemli kavramlardan biri de görünebilirliktir. Sisteme dahil olan her birim tanımlanmalı, aktivite raporları alınabilmeli, loglanabilmelidir. Bu amaca yönelik merkezi bulut tabanlı sıfır güven ağ teknolojileri daha çok rağbet görmektedir.

Şekil 2. de Forrester sıfır güven ağ modeli ana hatları gösterilmiştir.



Şekil 2. Forrester sıfır güven ağ modeli

4. BULGULAR VE YORUMLAR

Sıfır güven ağ mimarisinde kullanıcı güvenliğinden bahsedilmesi için, genel olarak bazı altyapıların kurulması gerekir. Sıfır güven güvenlik modelini yeni bir güvenlik stratejisi gibi düşünmek gerekmektedir. Bu strateji sıfır güven ağ mimarisinin tasarımı ile eyleme dönüşür.

Gelişmiş özellikli, davranış analizi yapan güvenlik duvarları, yerel ağların küçük parçalara ayrılıp her birinin çevre (perimeter) oluşturulması, erişim kurallarının tanımlanması ve uygulanması, vb. Ancak bir yandan atak vektörlerinin çoğalması, tehditlerin artması sebebiyle, bahsedilen metodolojilerin uygulandığı sektör ürünleri kullanarak aktif bir kuruluş için gerçekleştirdiğim test sonuçları aşağıdadır. Burada öncelikle kullanıcı erişimlerini kontrol etmek için yazılımların genel bir tanımı yapılmıştır.

- Uçbirim algılama ve yanıt yazılımları (Endpoint Detection and Response EDR): Geleneksel antivirüs çözümlerinde güvenlik ürünü devamlı aktif ve potansiyel olarak imzaları ve atak yüzeyleri bilinen güvenlik tehditlerine yönelik tedbirler ve önlem uygular. Diğer taraftan EDR ise daha çok sezgisel özellikleri kullanarak geleneksel antivirüs çözümlerini atlatmaya yönelik yazılmış, belki de daha önce hiç görülmemiş tehditleri algılayabilir.
- Genişletilmiş algılama ve yanıt yazılımları (Extended Detection and response XDR): XDR “birden fazla güvenlik ürününü tüm lisanslı bileşenleri birleştiren uyumlu bir güvenlik işlemleri sistemine yerel olarak entegre eden SaaS tabanlı, satıcıya özgü güvenlik tehdidi algılama ve olay müdahale aracı” olarak tanımlanabilir.

Temel perspektiften bakılırsa her iki (EDR,XDR) çözümün amacı veri görünürlüğü, veri analitiği ve tehdit istihbaratının ortak kullanımı ile otomatik tehdit algılama, yanıt sağlamak için tasarlanmış sistemler olarak da tanımlanabilir. EDR birden fazla uçbirimin bilgilerini toplayıp bunları korele edip ilişkileri anlamaya çalışır. XDR ise EDR kapsamının ötesine giderek uçbirim ile birlikte, bu uçbirimin bağlı bulunduğu sunucu sistemleri ile ilişkisini de analiz eder.

- Yönetilen algılama ve yanıt (Managed Detection and Response MDR): MDR bir teknoloji değildir. Yönetilebilir bir servis olarak kuruluşların uçbirim güvenliği ihtiyacını karşılamaya yönelik hizmettir. Saldırları sürekli izlemek için gerekli uzmanlığa sahip olmayan kuruluşlara büyük değerler sağlar. MDR belli güvenlik hedefleri olan ve bunların sonuçlarının olduğu bir sistem ile tanımlanır.

Kullanıcı erişim güvenliğini test etmek amacıyla, EDR hizmeti veren firma ürünlerini inceledim. Bu ürünlerin yeni versiyonları kullanıcı tarafında sıfır güven mekanizmasını ele alacak şekilde genişlemişlerdir.(Çoğu üretici firmanın EDR ürünü bulunmaktadır, XDR desteği ise çok az üretici firma tarafından desteklenmiştir). Çeşitli parametrelere göre değerlendirmeler Tablo 1 de ifade edilmeye çalışılmıştır.

Tablo1. Kullanıcı Güvenliği Çözümlerinin Karşılaştırılması

Kategori	Fortinet EDR	Checkpoint Harmony	SentinelOne EDR
Üreticinin Pazar yaygınlığı	Fortinet -Türkiye Next Generation Firewall konusunda en yaygın üretici durumundadır. Orta ve Küçük işletmelerde lider konumdadır.	Checkpoint pazardaki en eski firewall üreticisidir. Pazarda ciddi kayıp yaşamasına rağmen, hala üst segment müşteriler için tercih sebebidir.	Türkiye de çok yaygın olmayan bir markadır.
Diğer Güvenlik Ürünleri ile Entegrasyon	EDR ürününün doğal olarak Fortinet -Security Fabric yapısı ile fortinet ürünlerine entegrasyonu var. diğer üreticiler ile API desteğine ihtiyaç duyuyor.	Ürünün checkpoint cihazları ile uyumu var. Diğer ürünler için API desteği gerekir.	RestFul API desteği var. Diğer ürünlerle bu şekilde konuşabilir.
Ürünün Koruma Yeteneği	Erişim ayarlarında şüpheli (suspicious) engelleme seçeneği mevcut.Dış dünyaya bağlantı açıldığında bağlantıyı açan uygulamanın tanınmadığını belirleyebilir ve engelleme yapabilir.Bu bakımdan diğer ürünlerin çözümlerinden üstün performans sağladığı görüldü. Ek olarak sandboxing işleminin en net fark edildiği ürün olması da diğer avantajıdır.	Checkpoint Harmony test edilen zararlı yazılımları daha çalıştırmadan önce tespit edip silme işlemi gerçekleştirmiştir. Tespit edilen yazılımların sınıflandırılması isabetlidir. Meterpreter payload 1 çalıştırılmadan önce engelleyip silmiştir. Ürün üstünde gelen forensic analiz modülünün çoğu zaman başarılı sonuç verdiği görülmüştür. Davranışsal analiz raporlarının başarılı olduğu gözlemlenmiştir.	Kurulu olduğu sistem üzerinde diğerlerine göre daha az kaynak kullandığı gözlemlendi. Tespit edilen zararlıların hangi tekniği kullandığı tutarlı bir şekilde verilmiş. Sadece zararlı dosyaları değil, zararlı dosyaların kullandığı zararsız dosyaları da karantinaya aldığı gözlemlendi. Rapor formatı: csv dir. Ajan kurulu makinelerde log toplaması, remote shell session alma vb. birçok aksiyona imkan vermektedir. Threat Hunting (her an saldırı anında olduğunu düşünme ve buna uygun aksiyon alma) özelliği mevcut. Analizlerin grafiksel görünümü diğerlerine göre artı bir özellik olarak görülmüştür.

Yönetim Kolaylığı	En büyük dezavantajı ise dashboard yapısı olduğu söylenilebilir. Tespit edilen zararlıların grafik olarak incelenmesi kolay değil. Dashboard ekranı kullanıcı dostu değil.	Yönetimi en kolay çözümlerden biridir. Zararlı tespitinin evant graph içinde bulunabilmesi ve analiz edilmesi kolaydır. Kullanıcı ajan ara yüzü diğerlerine göre daha iyidir.	Bu ürünün ara yüzü checkpoint ürünündeki kadar iyi olmasa bile kullanım kolaylığı performansı iyidir. Kullanıcı dağıtımının kolay olması yönetilebilirliğini arttırmaktadır.
Cihaz Kaynak Kullanımı	Ürünün belirteçlerinde vaat edilen kaynak kullanım oranlarını sağlayamaması bir sorundur.	Kaynak kullanımını orta düzeydedir. Donanımı çok düşük makine haricinde performans sorunu çıkarmayacaktır.	Test edilen çözümler arasında en düşük kaynak kullanımı SentinelOne EDR dir. Aynı anda process sayısı çok azdır.

Ürünlerin kullanıcı tarafında yapılan teknik analizi ise Tablo 2 de ifade edilmiştir.

Tablo 2. Ürün Teknik Analiz

Teknik Yetenekler	Alt Özellik	Fortinet EDR	Checkpoint Harmony	SentinelOne EDR	Acronis
EPP (Endpoint protection)		Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Orta
EDR / XDR Endpoint Detection and Response / Extended Detection and Response	Mitre Att&CK	Zayıf	Çok İyi	Çok İyi	yok
	Incident Detail	orta	Çok İyi	Çok İyi	yok
	Remediation	İyi	Çok İyi	İyi	İyi
	Network Events	Çok İyi	iyi	iyi	yok
	Ransomware Protection	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi
	Execution Files Prevention	İyi	iyi	Çok İyi	Kötü
	Exfiltration Prevention	Çok İyi	orta	orta	yok
	XDR	var	yok	var	yok
	Threat Hunting	iyi	iyi	Çok İyi	yok
VA/Scoring (Vulnerability Analysis/Scoring)		orta	yok	iyi	Çok İyi
Inventory	Software	var	var	var	var-sorunlu
	Hardware	var	var	var	var
Device Control		var	var	var	var
Patching		yok	yok	yok	var
Backup & Recovery		yok	yok	yok	var
White Label		var	var	var	var
Forensic Capability		Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi	yok
Threat Intelligence (Tehdit İstihbaratı)		Çok İyi	Çok İyi	İyi	İyi
URL Filtering		yok-ayrı web servisi olarak bulunmaktadır.	var	yok	var
Browser Protection		yok	var	yok	yok
Mail Security		yok-ayrı mail servisi olarak bulunmaktadır.	var	yok	var-çalışmıyor
Mobile Threat Defence (MTD)		var	var	yok	yok
Network Security Plug-in		var	var	yok	yok
Sandboxing		var	var	yok	yok
Remote Management		yok	yok	var	var

Kullanıcı ve bilgisayarları sadece kuruluş içerisinde değil, kuruluş dışında da koruma altında olurlar. Sıfır güven ağ mimarisinde, uygulamaların birbiriyle etkileşimi, cihazlar doğrulanması çok önemli olsa da en kritik konu kullanıcı erişimleridir. Atak bir şekilde başlar ama son kullanıcı makinesinde son bulur. Atak yüzeyi engellenmesi, ağ üzerinde yatay harekete engel olur. Bu çalışmadaki asıl amaç ise kullanıcı erişimlerini kontrol edip güvenliğini sağlamak, giriş noktasında saldırıyı etkisiz hale getirmektir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sıfır güven ağ mimarisini uygulamak, altyapı veya süreçlerin toptan değiştirilmesinden ziyade bir yolculuktur. Bir kuruluş, en yüksek değerli veri varlıklarını koruyan sıfır güven ilkelerini, süreç değişikliklerini ve teknoloji çözümlerini aşamalı olarak uygulamaya çalışmalıdır. Çoğu kuruluş, devam eden BT modernizasyon girişimlerine yatırım yapmaya devam ederken belirsiz bir süre için hibrit bir sıfır güven/ çevre (perimeter) tabanlı mod da çalışmaya devam edecektir. Sıfır Güven ilkelerine dayalı bir mimariye geçmeyi içeren bir BT modernizasyon planına sahip olmak, bir kuruluşun küçük ölçekli iş akışı geçişleri için yol haritaları oluşturmasına yardımcı olabilir. Kuruluşun bu stratejiye nasıl geçtiği, mevcut siber güvenlik duruşuna ve operasyonuna bağlıdır. Artan tehditler, çoğalan atak ara yüzleri firmaların kendi güvenlik stratejisini değiştiremeden kullanıcılarının bundan zarar görmesine neden olmuştur. En azından kullanıcı operasyonlarında sıfır güven ağ mimarisine uygun olabilecek koruma yazılımları geliştirmişlerdir. Geleneksel yapıların dışında önerilen metodolojinin kullanılması ile saldırgan faaliyeti daha başlamadan bertaraf edilmiştir. Örneğin oltalama (ransomware) ataklarına karşı yaptığım testlerde, %100 başarı elde edilmiştir.

Yakın bir zamana kadar sıfır güven mimarisinin tam anlamıyla ağ ortamlarına uygulanacağını düşünülmektedir. Ağ güvenlik stratejisini değiştirebilmek için altyapının, uygun olarak hazırlanması gerektiği düşünülmektedir. Peki geçiş esnasında nasıl bir koruma sağlamalıdır? Testlerinin yapıldığı ürünlerin lokal ortamda hizmet veren karşılığı olsa da, tamamen merkezi olarak bulut ortamında kullanılan yapıların bu süreç içerisinde, maliyet ve gelişmiş BT güvenlik personeli açısından daha çok tercih edileceği düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda, kullanıcı güvenliğinin sağlanması adına elde edilen verilerin, yapay zeka uygulamalarının geliştirilmesinde kullanılacağı düşünülmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Teşekkür

Makaleyi değerlendiren hakemlere değerli katkılarından dolayı teşekkürü bir borç bilmekteyiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Assunção, P. (2019, January, 16-16). A zero trust approach to network security, *Proceedings of the Digital Privacy and Security Conference*. Portugal, 65-72. <https://doi.org/10.11228/dpsc.01.01.007>

Belal A., Mark A., Gregory & Li, S. (2021, Nov, 24-26). Uplifting Healthcare cyber resilience with a multi-access edge computing zero-trust security model, *31st International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC)*, Australia, 192-195. <https://doi.org/10.1109/ITNAC53136.2021.9652141>

- Bicakci, K., Uzunay, Y. & Khan, M. (2021, December, 2-3). Towards zero trust: the design and implementation of a secure end-point device for remote working, *14th International Conference on Information Security and Cryptology*, Ankara, Türkiye, 28-33. <https://doi.org/10.1109/iscturkey53027.2021.9654298>
- Camphell, M. (2020). Beyond zero trust: Trust is a vulnerability. *Computer*, 53(10), 110-113. <https://doi: 10.1109/MC.2020.3011081>
- Chen, B., Qiao, S., Zhao, J., Liu, D. Shi, X., Lyu, M., Chen, H., & Lu, H. (2021, July, 1-1). A security awareness and protection system for 5g smart healthcare based on zero-trust architecture, *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), China. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3041042>
- Chen, R., Shu, F., Huang, S., Huang, L., Liu, H., Liu, J., & Lei, K. (2021). BIdm: A Blockchain-Enabled Cross-Domain Identity Management System, *Journal of Communications and Information Networks*, 6(1), 44-58.
- Chen, L., Dai, Z., Chen, M., & Li, N.(2021, May, 29-30) *Research on the security protection framework of power mobile internet services based on zero trust*. 6th International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), China, 65-68. <https://doi.org/10.1109/ICSGEA53208.2021.00021>.
- Dabrowski, M., & Pacyna, P. (2022, January, 14-16). *Blockchain-based identity discovery between heterogenous identity management systems*. 6th International Conference on Cryptography Security and Privacy (CSP), Poland, 131-137. <https://doi.org/10.1109/CSP55486.2022.00032>
- Dayna, E., Si Ya N., De Cusatis C., & Sager, A. (2017). Autonomic security for zero trust networks, *National Science Foundation under CCDNI Integregation (Area 4): Application Aware Software Defined Networks for Secure Cloud Services*, NY-USA. 288-293. <https://doi.org/10.1109/uemcon.2017.8249053>
- DeCusatis, C., & Liengtiraphani, P., (2016, Nov, 18-20). *Implementing zero trust cloud networks with transport access control and first packet authentication*. IEEE International Conference on Smart Cloud, USA. 5-10. <https://doi.org/10.1109/smartcloud.2016.22>
- Dhar, S., & Bose, I., (2021). Securing Iot devices using zero trust and blockchain, *Journal of Organization Computing and Electronic Commerce*, 31(1), 18-34. <https://doi.org/0.1080/10919392.2020.1831870>
- D'Silva, D., & D. Ambawade, D., (2021, April, 02-04). *Building a zero trust architecture using kubernetes*. 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, India. 1-8. <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9418203>
- Elisa Bertino, E., & Brancik, K., (2021, Aralık, 10-14). *Services for zero trust architectures - a research road- map*. IEEE International Conference on Web Services (ICWS), USA, 14-20. <https://doi.org/10.1109/ICWS53863.2021.00016>
- Fang, W., & Guan, X., (2022, March, 04-06). *Research on iOS Remote security access technology based on zero trust*. IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), China. 238-241. <https://doi.org/10.1109/ITOEC53115.2022.973-4455>

- Hatayema, K., Kotani, D., & Okabe, Y. (2021, March, 22-26). *Zero Trust Federation: Sharing Context under User Control towards Zero Trust in Identity Federation*, PerFlow 2021: International Workshop on Persavive Information Flow, Kyoto, Japan, 514-519. <https://doi.org/10.1109/PERCOMWORKSHOPS51409.2021.9431116>
- Hosney, E., Abdel Halim, I.T., & Yousef, A.H. (2022, Mart, 09-10). *An artificial intelligence approach for deploying zero trust architecture (zta)*, 5th International Conference on Computing and Informatics (ICCI), Egypt, 343-350. <https://doi.org/10.1109/ICCI54321.2022.9756117>
- Kang, C., Li, E., Li, Y., Wang, L., Liu, Y., & Han, Z. (2022, May, 27-29). *Dynamic access control architecture distribution master station based on extended trust evaluation*. IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), China, 506-510. <https://doi.org/10.1109/CIEEC54735.2022.9846041>
- Kuperberg, M. (2020). Blockchain-based identity management: A survey From the enterprise and ecosystem perspective, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 1008-1027.
- Liu, J., Wang, H., Xian, M., & Kong, C., (2020, December, 25-27). *A small LAN zero trust network model based on elastic stack*, 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE), China. 1075-1078. <https://doi.org/10.1109/ICMCCE51767.2020.00236>
- Melo, T., Amaral, S. & Gondim, J.J.C, (2021, Nov, 18-19). *Integrating zero trust in the cyber supply chain security*, 6th Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS 2021), Brasil. <https://doi.org/10.1109/WCNPS53648.2021.9626299>
- Meng, L., Huang, D., An, J., Zhou, X., & Lin, F. (2022). A continuous authentication protocol without trust authority for zero trust architecture, *China Communications Magazine*, 19(8), 198-213.
- Patil, A., Karkal, G., Wadhwa, J., Sawood, M., & Reddy, K.D, (2020, Dec, 10-13). *Design and implementation of a consensus algorithm to build zero trust model*. IEEE 17th India Council International Conference (INDICON), India. <https://doi.org/10.1109/indicon49873.2020.9342207>
- Rodigari, S., O'Shea, D., McCarthy, P., McCarry, M., & McSweeney, S., (2021, Sept, 5-10). *Performance analysis of zero-trust multi-cloud*. IEEE 14th International Conference on Cloud Computing, Ireland. 730-732. <https://doi.org/10.1109/cloud53861.2021.00097>
- Rocha, B.C., Melo, L.P. & Sousa Jr, R.T., (2021, Nov, 18-19). *Preventing APT attacks on LAN networks with connected IoT devices using a zero trust based security*. 6th Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS), Brasil <https://doi.org/10.1109/wcnps53648.2021.926270>
- Rose, S., Borchert, O., Mitchell, S. & Connelly, S. (2020), Zero trust architecture, special publication (NIST SP), *National Institute of Standards and Technology*, Gaithersburg, MD, Stafford. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.800-207>
- Samaniego, M. & Deters, R. (2018, July, 2-7). *Zero-trust hierarchical management in IoT*. IEEE International Congress on Internet of Things, Canada, 88-94. <https://doi.org/10.1109/ICIOT.2018.00019>

- Sheikh, N., Pawar M., & Lawrence,W., (2021, May, 10-13). *Zero trust using Network Micro Segmentation*. IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), 1-6, <https://doi.org/10.1109/INFOCOM-WKSHPS51825.2021.9484645>
- Srour, L., Kayssi, A., & Chelab, A.(2006, September, 1-1). *Reputation-based algorithm for managing trust in file sharing networks*. 2006 Securecomm and Workshops, Lebanon. 1-10, <https://doi.org/10.1109/SECCOMW.2006.359538>.
- Syed, N. F., Shah, S. W., Shaghaghi,A., Anwar, A., Baig, Z., & Doss,R.,(2022). Zero trust architecture (ZTA): A comprehensive survey, *IEEE Access*, 57143-57179, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174679>.
- Tao, Y., Lei, Z., & Ruxiang, P., (2018, Dec, 11-13). *Fine-grained big data security method based on zero trust model*, 2018 IEEE 24th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), China, 1040-1045. <https://doi.org/10.1109/ICPADS.2018.00140>
- Tian, X., & Song, H., (2021). A zero trust method based on BLP and BIBA model, *2021 14th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, 96-100. <https://doi.org/10.1109/ISCID52796.2021.00031>
- Vanickis, R., Jacob, P., Lee, B., & Dehghanzadeh, S. (2020, June, 21-22). *Access control policy enforcement for zero-trust networking*. European Union's Horizon 2020 research and Innovation programme under grant agreement 700071, Ireland.
- Wang, S., Pei, R., & Zhang, Y., (2019). EIDM: A ethereum-based cloud user identity management protocol, *IEEE Access Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal*, 7, 115281-115291. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2933989>
- Wu, G.Y.,Yan, H.W., & Wang, Z.J.,(2021, Aug, 13-15). *Real identity based access control technology under zero trust architecture*. International Conference on wireless Communications and Smart Grid (ICWCSG), China, 18-22. <https://doi.org/10.1109/ICWCSG53609.2021.00-011>
- Wu, K., Shi, J.,Guo, Z., Zhang, Z., & Cai,J. (2021, June, 25-27). *Research on security strategy of power internet of things devices based on zero trust*. International Conference on Computer Engineering and Application (ICCEA), China, 79-83. <https://doi.org/0.1109/ICCEA53728.2021.00023>
- Xiaojan, Z., Liandong, C., Jie, F., Xiangqun,W., & Qi,W. (2021, Jan, 8-10). *Power IoT security protection architecture based on zero trust framework*. IEEE 5th International Conference on Cryptography, Security and Privacy, China, 166-170. <https://doi.org/10.1109/csp51677.2021.9357607>
- Yang, D., Zhao,Y.,Wu, K., Guo, X., Peng, H. (2021, October 29 - November 1). *An efficient authentication scheme based on zero trust for UAV swarm*. 2021 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA), China, 356-360. <https://doi.org/10.1109/NaNA53684.2021.00068>
- Zhang, F & Jiang, X., (2021, March, 26-28). *The zero trust security platform for data trusteeship*, 2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), China, 1014-1017. <https://doi.org/10.1109/AEMCSE51986.2021.00207>

Zhang, P., Tian, C., Shang, T., Liu, L., Li, L., Wang, W., & Zhao, Y. (2021, May, 14-16). *Dynamic access control technology based on zero-trust light verification network model*. IEEE 3rd International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE), China, 712-715.



Derleme Makale / Review Article

ROBOTİK CERRAHİ UYGULAMALARININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF ROBOTIC SURGERY APPLICATIONS

Yavuz BAŞTUĞ¹ Osman YAZICIOĞLU² Oğuz BORAT³

<https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1104591>

Sorumlu Yazar / Corresponding Author
oyazicioglu@ticaret.edu.tr

Geliş Tarihi / Received
16.04.2022

Kabul Tarihi / Accepted
27.10.2022

Öz

Robotik cerrahide yeni ürün geliştirme ve araştırmalar hızla ilerlemektedir. Robotik cerrahi üroloji gibi alanlarda kullanılmaktadır. Dokular cerrahinin hedef ortamıdır ve biyomekanik özellikleri hem ameliyat öncesi planlamada hem de cerrahi yöntemin uygulanmasında önemli rol oynamaktadır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile yumuşak dokuların mekanik davranışını değerlendirilmektedir. Gerilme-gevşeme testinde önceden tanımlanmış bir gerilme birim şekil değiştirme uygulanmakta ve buna karşılık gelen gerilme zamanın bir fonksiyonu olarak takip edilmektedir. Tüm bifazik ve viskoelastik yumuşak dokular önce gevşeme fazını sergilemekte ve daha sonra tüm yük bir dokunun katı matrisi tarafından taşınmaktadır. Tendon fasyadan daha az uyarlanabilmekte, ancak kasla seri halinde olmak, kasın uzamasıyla sertliğini telafi edebilmektedir. Kemikler viskoelastik davranış sergilemekte, bu da gerilmenin sadece birim şekil değiştirmeye değil, aynı zamanda gerilme geçmişine de bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Kemik çalışmasında yukarıdaki fenomenlerin her birine dayanan deneysel reoloji yöntemleri kullanılmaktadır. Islak bir kemik için kayıp tanjanti ve depolama modülü zamana bağlı olmaktadır. Eksik modül iskelet kası gibi organlar için saptanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Biyomekanik, doku viskoelastisitesi, robotik cerrahi.

Abstract

New product development and research in robotic surgery is progressing rapidly. Robotic surgery is used in fields such as urology. Tissues are the target environment of surgery and their biomechanical properties play an important role both in preoperative planning and in the application of the surgical method. The mechanical behavior of soft tissues is evaluated with the stress-strain curve. In the stress-relaxation test, a predefined stress strain is applied and the corresponding stress is followed as a function of time. All biphasic and viscoelastic soft tissues first exhibit the relaxation phase and then the entire load is carried by a solid matrix of tissue. The tendon is less adaptable than the fascia, but being in series with the muscle can compensate for the stiffness of the muscle by lengthening. Bones exhibit viscoelastic behavior, meaning that stress is dependent not only on strain but also on stress history. Experimental rheology methods based on each of the above phenomena are used in bone study. For a wet bone, the loss tangent and storage modulus are time dependent. The missing module is detected for organs such as skeletal muscle.

Keywords: Biomechanics, robotic surgery, tissue viscoelasticity.

¹Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Haydarpaşa Numune Eğitim ve Araştırma Hastanesi Üroloji Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye. yavuzbastug@gmail.com, Orcid.org/0000-0002-9256-940X.

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. oyazicioglu@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-0476-4396.

³İstanbul Ticaret Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye. oborat@ticaret.edu.tr, Orcid.org/0000-0002-2242-6024.

1.GİRİŞ

Robotik cerrahi tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de İstanbul'da onaltı, Ankara'da sekiz hastanede gerçekleştirilmektedir (Dialani, 2021; Robotik Cerrahi, 2021). Tıbbi robotlar, tıbbi cihaz endüstrisinin hızla büyüyen bir sektörünü oluşturmaktadır. Evde yardım, kriz müdahalesi, ihmal edilebilir invaziv tıbbi cerrahi, hedefe yönelik tedavi veya protez için kullanılıp kullanılmadıklarına bakılmaksızın, bu günlerde giderek daha fazla kullanılmakta ve dünya çapında tıbbi bakımı dönüştürmektedir (Dialani, 2021; Yazıcıoğlu & Borat, 2021). Yenilikçi gelişmeler istikrarlı bir şekilde geliştikçe, tıbbi cerrahi kendisini birçok hastalık ve durumun tedavisi için uygun rafine bir disiplin olarak kurmuştur. Bu nedenle, bilgisayar donanımı ve yazılımı zaman içinde geliştikçe, bu gelişmeler ameliyathaneye de entegre edilmiştir. Tıbbi hizmetler ve sağlık hizmetlerinde en popüler robotik uygulamalar cerrahi ile ilgilidir. Birçok işlem bir çeşit robot kullanılarak gerçekleştirilir (Yazıcıoğlu & Borat, 2021). Robotik cerrahinin kullanım alanları gastrointestinal, genel cerrahi, jinekoloji, kalp, oftalmoloji, ortopedi, pediatri, omurga, göğüs, organ nakli cerrahisi ve ürolojidir. Robotik cerrahi pazarı temel olarak üç bölüme ayrılmıştır: cerrahi sistemler, cerrahi hizmetler ve aletler ve aksesuarlar. Robotik cerrahi pazar gelirinin 2031 yılına kadar 16,8 milyar doları aşacağı tahmin edilmektedir (Research and Markets, 2021). Cerrahi robotların yardımıyla büyük ilerlemeler kaydedildi, uzaktan cerrahi, minimal invaziv cerrahi ve insansız cerrahi mümkün oldu. Robotik kullanımı nedeniyle ameliyat hassasiyetle, minyatürleştirilerek, daha küçük kesilerle yapılır; kan kaybı azalır, ağrı azalır ve iyileşme süresi hızlanır (Yazıcıoğlu & Borat, 2021).

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Literatür taraması makaleler ve ticari web siteleri kullanılarak yapılmıştır. Mevcut her robotik yardımcı ameliyat için kullanılabilirlik, içerik ve doğrulama durumu hakkında bilgi toplandı.

Artikülasyon ve normal manipülasyonun ötesinde üç boyutlu büyütme, gelişmiş ergonomi sağlar. Bu teknikler sayesinde hastanede kalış süresi, kan kaybı, transfüzyon ve ağrı kesici kullanımı azaltılır. Kadınlar kaygı ve tereddütlerini dile getirirler çünkü robotik cerrahi yeni bir uygulamadır ve bunu daha önce duymamışlardır. Hekimlere duyulan güvenin bu kaygıyı azalttığı, robotik cerrahi kabul etmede etkili olduğu ve robotik cerrahiden sonra kendilerini fiziksel olarak çok iyi hissettikleri bildirilmektedir (Kurt ve ark., 2020). Mevcut açık cerrahi tekniğinin cerrahi alana sınırlı erişim, uzun iyileşme süresi, uzun çalışma saatleri, daha fazla kan kaybı ve cerrahi izler gibi birçok mahzuru vardır.

Cerrahi robotun maliyeti birim başına 1 ila 2,5 milyon ABD dolarıdır (Research and Markets, 2021). Tek kullanımlık maliyet normalde prosedür başına 1500 \$ 'dır. Sistemi çalıştırmak için ek cerrahi eğitim gereklidir. Robotik cerrahi eğitimi önem kazanmıştır. Simülatörlerin kullanımı ile robotik cerrahi eğitimi kolaylaştırılmıştır. Amerikan Gastrointestinal ve Endoskopik Cerrah Robotik Masters Serisi Derneği, Robot Destekli Cerrahi eğitim programının Temel Becerilerini sağlar (Chen ve ark., 2020). Öğrenme aşaması yoğundur ve cerrahların kullanımlarında ustalaşmak için 150 ila 250 prosedür gerçekleştirmeleri gerekir. Diğer minimal invaziv cerrahi yaklaşımlarla karşılaştırıldığında hasta anketleri, morbiditenin azalması, sonuçların iyileşmesi, kan kaybının azalması ve ağrının azalması beklentilerine dayanarak prosedürü seçtiklerini göstermektedir. Robot destekli cerrahi, cerrahın cerrahi aletler üzerinde daha iyi kontrol sahibi olmasını ve cerrahi alanı daha iyi görmesini sağlar. Doğal olarak oluşan el titremeleri robotun bilgisayar yazılımı tarafından filtrelenir. Son olarak, cerrahi robot cerrahi ekipleri döndürerek sürekli olarak kullanılabilir. Laparoskopik kamera konumlandırması, robotik kontroller altındaki insan yardımına kıyasla daha az istenmeyen hareketlerle de önemli ölçüde daha karardır. Cerrahlar aletin hastayla etkileşimini hissedemezler. Bazı sistemler, cerrah ve doku arasındaki etkileşimi

iyileştirmek için zaten bu dokunsal geri bildirimine sahiptir. Robotlar ayrıca çok büyük olabilir, enstrümantasyon sınırlamalarına sahip olabilir ve mevcut cihazlar yalnızca tek kadranlı uygulama için kullanıldığından çoklu kadran ameliyatı ile ilgili sorunlar olabilir. Sistemin kullanımını benimseyen cerrahlar için hızlı bir öğrenme eğrisi vardır. Amerikan Jinekologlar Kongresi, robotik cerrahi ile ilgili komplikasyonlar, reoperasyonlar, kalıcı yaralanmalar ve iç organ hasarlarını inceledi. Bir çalışma endometriyum kanserine robot destekli cerrahi yaklaşımı incelemektedir. Bu içerikte cerrahi sonuçların morbidite açısından pozitif, ameliyat başına ve ameliyat sonrası açısından laparotomiye dönüş oranının düşük olduğu saptanmıştır (Chen ve ark., 2020).

Yaşlı ve fazla kilolu insanlar gibi kırılgan hastalarda cerrahi zorlukların üstesinden gelmek için optimal cerrahi tedavi olarak robot destekli cerrahi önerilmektedir (Kakkos ve ark., 2021).

Gizli Markov Modelleri, gerçek zamanlı bakış hareketi tanıma için kullanılır ve robotik kameranın göz hareketlerine karşı bağışıklık kazanırken kaydırmasına, eğmesine ve yakınlaştırmasına izin verir. Viewpoint viewer için kalibrasyon değişiminin üstesinden gelen ve klinik uygulamasını basitleştiren bir çevrimiçi kalibrasyon yöntemi teklif edilmektedir (Fujii ve ark., 2017).

Çin'de 153 robot yardımcı cerrahi ve 123 alışılmış cerrahi olmak üzere 276 hasta ile yapılan bir araştırmada ameliyat sonrası komplikasyonların, robot yardımcı cerrahide ve alışılmış cerrahide benzer sonuçlar verdiği görüldü (Wang ve ark., 2020).

Farklı jinekolojik cerrahi türleri üzerine yapılan bir araştırma, Senhance® robotik sisteminin uygulanabilir ve güvenli olduğunu bildirmektedir (Siaulysa., 2021). Bazı olgularda minimal invaziv cerrahi, laparotomiye kıyasla yüksek riskli komplikasyonların azalmasını ve hastanede kalış süresinin kısalmasını sağlamaktadır (Matsuo ve ark., 2021).

Çevresel Etki Değerlendirmesi açısından Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık laparoskopik cerrahi 1,6 milyon prosedür, robot destekli cerrahi 1,4 milyon prosedür ve paketlenmiş karbondioksit gazı satışları 0,4 milyon prosedüre yükselmiştir. Minimal invaziv cerrahide insuflasyon için kullanılan ana gaz karbondioksittir. Toplam çalışma süresi, bu gazın sera etkisinin% 9 ila% 26'sına katkıda bulunduğu üç milyon saatin üzerinde olduğu saptanmaktadır. (Power ve ark., 2012). Bazı olgularda minimal invaziv cerrahi, laparotomiye kıyasla yüksek riskli komplikasyonların azalmasını ve hastanede kalış süresinin kısalmasını sağlamaktadır (Matsuo ve ark., 2021). Simülasyon egzersizlerini içeren Da Vinci© skill simulator'dan biri olan prospektif, tek merkezli gözlemsel çalışma hakkında bir eğitim kursu ve her iki eğitim kursunun uygulanması sonucunda iki robot destekli prosedürle çift konsol tarafından kontrol edilen ekipmanın hem in vivo cerrahi simülasyonunda uygulanabilir ve güvenli olduğu bulunmuştur. İn vivo operasyonların hiçbiri laparoskopik cerrahiye dönüşüm gerekmemiştir. Ameliyattan sonraki 30 gün içinde hiçbir hasta transfüze edilmediği veya yeniden ameliyat edilmediği belirtilmektedir (Margueritte ve ark., 2020). Doku mekaniği ve kemiklerin viskoelastik davranışları robotik cerrahide ele alınmaktadır (Stecco ve ark., 2021; Yamashita ve ark., 2001).

2.1. Doku Biyomekaniği ve Robotik Cerrahi

Doku biyometiğinde temel kavramlar kullanılması önemlidir. Normal gerilme, birim şekil değiştirme, karmaşık gerilme ve kayıp faktörü kavramları bunların içinde önemli yere sahiptir. Biyomalzemelerin viskoelastisitesini düzenleyen kurucu ilişki bu kavramlar kullanılarak kurulmaktadır. Dokuların mekanik davranışı gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile incelenmektedir. Bu kavramlar aşağıda kısaca gözden geçirilmektedir.

Normal gerilme $\sigma=P/A$ ve kayma gerilmesi $\tau=V/A$ olarak tanımlanır. Burada P, kesit alanına dik olan normal kuvvettir ve V, kesit alanına teğet olan kesme kuvvetidir. Birim şekil değiştirmenin

tanımında kullanılan ilk uzunluk (L_i) ve son uzunluk (L_f) bir çubuk için Şekil 1'de gösterilmiştir. Birim şekil değiştirme üç şekilde tanımlanmaktadır:

Lagrangian birim şekil değiştirmesi tanımı Denklem (1)'de verilmektedir.

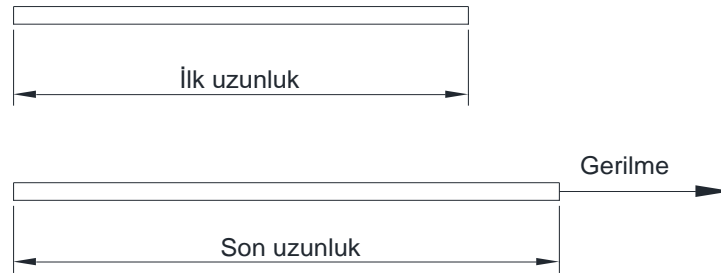
$$\varepsilon=(L_f-L_i)/L_i \quad (1)$$

Euler birim şekil değiştirmesi tanımı Denklem (2)'de verilmektedir.

$$\varepsilon=\ln (L_f/L_i) \quad (2)$$

Son olarak doğal birim şekil değiştirmesi tanımı ise Denklem (3)'te verilmektedir.

$$\varepsilon=(L_f-L_i)/L_f \quad (3)$$



Şekil 1. Birim Şekil Değiştirme Tanımı için İlk Uzunluk ve Son Uzunluk

Tek eksenli gerilme durumunda, gerilme-birim şekil değiştirme arasında $\sigma=E\varepsilon$ ve $\tau=G\gamma$ bir bağıntı vardır. Burada E elastisite modülü, G kayma elastiklik modülü ve γ kayma şekil gerilmesidir. Kayma şekil değiştirmesi, radyan olarak dik açıdaki değişimdir.

Biyomalzemelerin viskoelastisitesini düzenleyen kurucu ilişki Denklem (4)'te verilmiştir.

$$\tau^*=G^*\gamma^* \quad (4)$$

burada karmaşık kayma elastiklik modülü G^* , karmaşık, kayma gerilmesi τ^* ve karmaşık kayma gerilmesi γ^* ile ilgili malzeme özelliğidir. Karmaşık kayma gerilmesi, genlik ve açısal frekans ω (Denklem 5) ile zaman içinde bir salınım olarak ifade edilmektedir.

$$\tau^*=t_0e^{i\omega t} \quad (5)$$

Böyle bir kayma gerilmesine yanıt olarak, karmaşık bir kayma gerilmesi γ^* 'dir. Genlik y_0 , ω açısal frekansta salınır, ancak bir faz açısı δ kadar geride kalmaktadır (Denklem 6).

$$\gamma^*=y_0e^{i(\omega t - \delta)}=y_0e^{i\omega t}/e^{i\delta} \quad (6)$$

Denklem 4'ün G^* 'yi çözmek için yeniden düzenlenmesi ve Denklem 5 ve 6'daki karmaşık gerilme-birim şekil değiştirme ifadelerinin değiştirilmesi, bu ifadeyi karmaşık modül için verir (Denklem 7).

$$G^*=\tau^*/\gamma^*=(\tau_0/y_0)e^{i\delta}=(\tau_0/y_0)(\cos\delta+i\sin\delta) \quad (7)$$

Denklem 8, karmaşık modülün bileşenlerini şöyle tanımlar:

$$G^* = G' + iG'' \quad (8a)$$

$$G' = (\tau_0 / \gamma_0) \cos \delta \quad (8b)$$

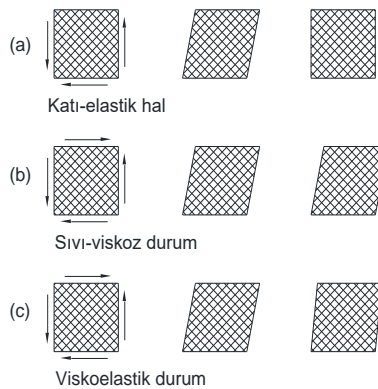
$$G'' = (\tau_0 / \gamma_0) \sin \delta \quad (8c)$$

G' kayma depolama modülü ve G'' kayma kaybı modülü olarak bilinir.

Son olarak, G'' / G' oranına kayıp faktörü denir, çünkü malzemenin enerjiyi depolayabilme kabiliyetine göre enerjiyi sönmüleme kabiliyetini ölçer:

$$\text{kayıp faktörü} = G'' / G' = \tan \delta \quad (8d)$$

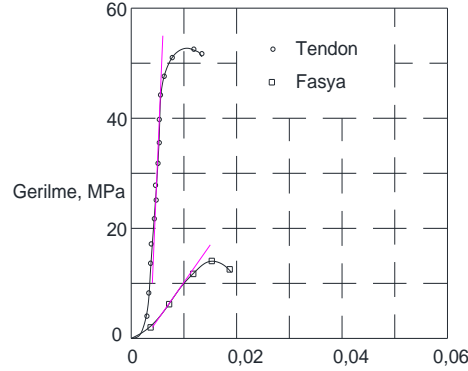
Makroskopik olarak G' , G'' ve $\tan \delta$ miktarları reometri kullanılarak ölçülür. Enstrümantal girinti testi, aynı özelliklerin karşılaştırılabilir değerlerini çok daha küçük ölçekte ölçmek için kullanılır. Alt katı kayma gerilmesi uygulayarak kesme gerginlik oluşmasına neden oldu. Kuvvetin kaldırılmasından sonra, katı elastik durumda orijinal şekline geri döner (Şekil 2a). İdeal katıların, Hooke yasasını temsil eden denklemlerle empoze edilen gerilmeye mekanik tepkisi. Newton sıvıları ideal sıvıların denklemi temsil eden tepkisi (Şekil 2b). Viskoelastik malzeme söz konusu olduğunda, tepki karakteristikleri Voigt modeli için denklem ile katılar ve sıvılar arasındadır (Şekil 2c). Kornea ve sklera, fizyolojik gerilme altındayken tipik olarak elastik davranış sergileyen viskoelastik materyallerdir. Bununla birlikte, normal göz içi basıncı altında, kornea ve sklera keratokonusta ve dejeneratif miyopide sürünür. Kornea şişkin ve bu hastalığın karakteristik eksenel gerilme sonuçları ne bu dengesiz. Hastalıkların anlaşılması ve uygun tedavilerin geliştirilmesi için dokuların elastik ve viskoz özelliklerinin karakterizasyonu esastır. Dokunun davranışını anlamak, uygulanan gerilmeler altında sistemin mekanik reaksiyonlarını incelemekle ilgilidir. Biyomalzemeler karmaşık ve homojen olmayan malzemeler olmasına rağmen, bunları anlamamız ideal katı ve sıvıların çok temel anlayışlarına dayanmaktadır.



Şekil 2. Üç Deformasyon Durumu: (a) İdeal Katıların Uygulanan Gerilmeye Mekanik Tepkisi (b) İdeal Sıvıların Tepkisi (c) Katılar ve Sıvılar Arasında Özellik Gösteren Viskoelastik Malzemenin Tepkisi

Yumuşak dokuların mekanik davranışı gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi ile incelenir. Yükleme ve boşaltma testinde önceden tanımlanmış bir çekme gerilmesi uygulanır. Böylece, zamana bağlı olarak elde edilen birim şekil değiştirmesi. Tüm bifazik ve viskoelastik yumuşak dokular önce bir gevşeme fazı sergiler ve daha sonra tüm gerilme bir dokunun katı matrisi tarafından taşınır. Tendondaki gerilme % 4'ü aştığında mikroskobik kopma meydana gelebilir. Bazı tendonlarda,

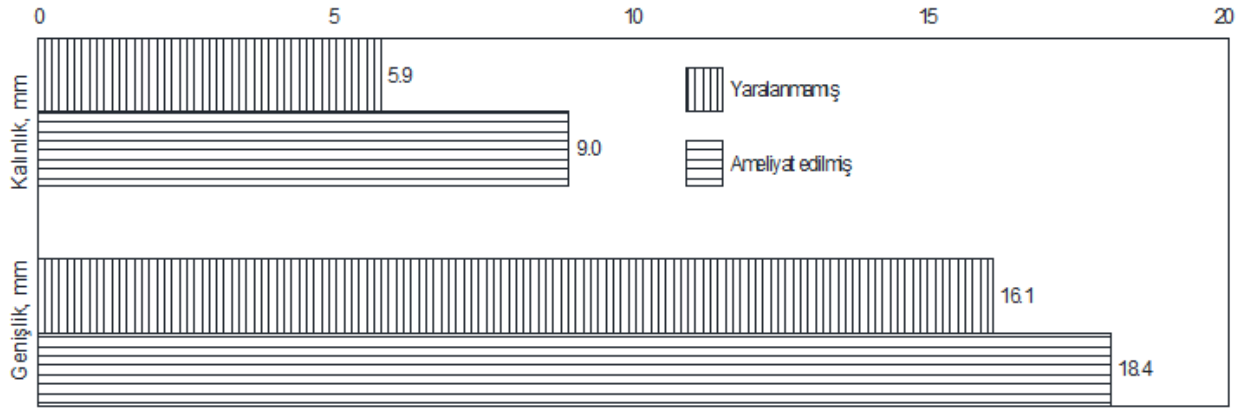
gerilme düzenleri uzunluk boyunca aynı değildir. Bununla birlikte, insan kaslarının çoğunluğu için, tendonun dış ve iç kısımları arasındaki gerilme transferi tam olarak bilinmemektedir. Tendon, fasyadakine benzer bir gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine sahiptir. Birim şekil değiştirmedeki artış gerilmeye yanıt olarak daha hızlıdır. Tendon fasyadan daha az uyarlanabilir, ancak kas ile seri olduğu için kasın gerilmesi ile sertliğini telafi edebilir. Tendon ve fasya için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Tendon ve Fasyanın Gerilme-Birim Şekil Değiştirme Eğrileri (Stecco ve ark., 2021)

Her dokunun tendon ve fasya için tolere edebileceği en yüksek gerilme ve birim şekil değiştirme sırasıyla 53 MPa ve 0,009, 14 MPa ve 0,016 olmaktadır. Kaslar için en yüksek gerilme ve birim şekil değiştirme ise 0,11 MPa ve 0,061 olmaktadır. Fasya; her organı, kan damarını, kemiği, sinir lifini ve kası çevreleyen ve yerinde tutan ince bir bağ dokusu kılıfıdır. Doku, içyapıyı sağlamaktan daha fazlasını yapar ve fasya neredeyse cilt kadar hassas yapan sinirlere sahiptir. Tendon, birim şekil değiştirmesinin artmasına yanıt olarak gerilmenin daha hızlı artmasıyla fasyaya benzer bir gerilme-birim şekil değiştirme eğrisine sahip olur. Tendon fasyadan daha az uyarlanabilir, ancak kas ile seri halinde olmak, kasın uzamasıyla sertliğini telafi edebilir (Stecco ve ark., 2021). Aşil tendonu vücuttaki en güçlü ve en büyük tendondur (Standring ve ark., 2008). Gastroknemius ve soleus kaslarının yapışık tendonu olarak plantaris'ten küçük bir katkısı olabilir. Kaslar ve Aşil tendonu baldırın arka, yüzeysel kompartmanındadır (O'Brien, 2005). Tendonların dördü için yapılan kırılma testleri, $66,83 \pm 14,34$ ila $112,37 \pm 9,39$ MPa arasında değişen nihai gerilmede önemli farklılıklar ortaya koydu (Matson ve ark., 2012). Bu mukavemet sekoya için verilen 415 MPa'dan çok daha azdır. Ayrıca, paslanmaz çelik AISI 316 için mukavemet 552 MPa olmaktadır.

Ameliyat edilen ve yaralanmayan Aşil tendonları arasındaki yapısal ve mekanik özelliklerdeki farklılıkları, Aşil tendonlu tecrübeli badmintonculardan, ameliyat olup oyuna geri dönenlere göre tanımlamak için bir çalışma yapılmıştır (Sánchez ve ark., 2021). Araştırma sonuçlarına göre yaralanmamış ve yaralanma sonunda ameliyat edilmiş Aşil tendonları için kalınlık ve genişlik değerleri Şekil 4'te verilmektedir.

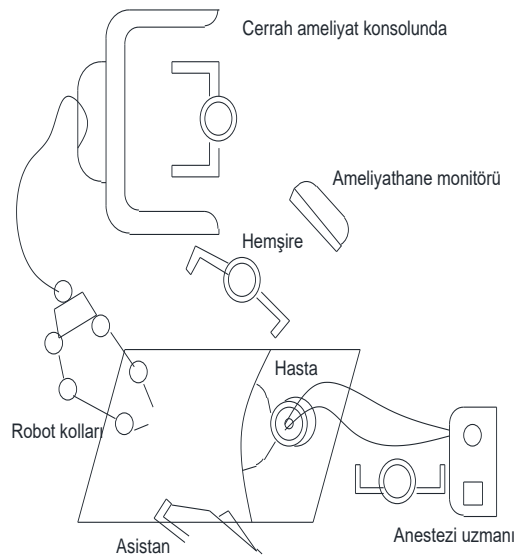


Şekil 4. Ameliyat Edilen ve Yaralanmayan Aşil Tendonları Arasındaki Mekanik Özellik Farklılıkları (Sánchez ve ark., 2021)

Eklem teması, bağ ve Aşil tendonu kuvvetlerinin hesaplanan kuvvet-zaman profillerinin ayak bileği eklemi etrafındaki momentin zaman-tarih eğrisine göre değiştiği ve yürüme ve koşma için tahmini maksimum Aşil tendonu kuvvetlerinin vücut ağırlığının 3,9 ve 7,7 katı olduğu bildirilmiştir (Giddings ve ark., 2000).

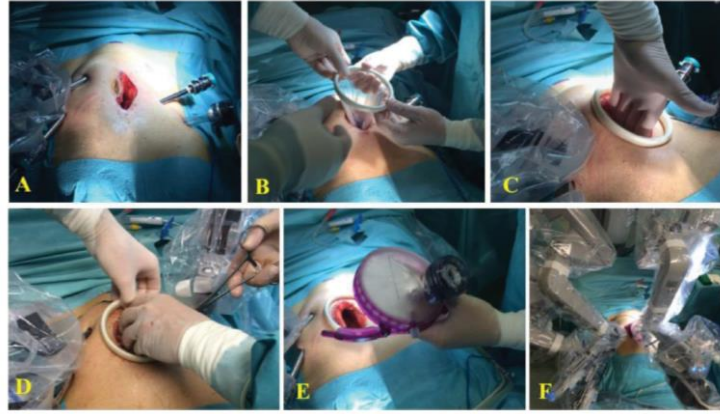
Yaralanmamış ve ameliyat edilmemiş Aşil tendonunun dinamiklerini incelerken, Şekil 4'teki mekanik veriler sadece nitel yorumlama için yararlıdır. Yürüme sırasında kütlesi 70 kg olan bir kişinin Aşil tendonu üzerindeki kuvvet yaklaşık 2678 N'dir. Bu nedenle Şekil 4'te verilen sertlik değerini bu kuvvetle dinamik olarak yorumlamak mümkün değildir. Sistemi insan bacağındaki diğer bileşenlerle birlikte dinamik olarak incelemek gerekmektedir.

Minimal invaziv cerrahinin de sınırlamaları vardır. Daha belirgin sınırlamalardan bazıları, ekipmanın teknik ve mekanik yapısını içerir. Cerrahlar, 2 boyutlu bir görüntü izlerken aletleri manipüle etmeyi biraz zor bulmaktadır. Cerrahın her hareketinin ters sırada olduğu dayanak etkisi cerrah için sezgiseldir. En büyük mahzuru, özellikle uzun cerrahi işlemler sırasında meydana gelen cerrahın el titremelerinin aletlere yansıtılmasıdır. Bu sınırlamalar cerrahi robotların daha da geliştirilmesini sağlayan faktördür. Şekil 5 bir robotik cerrahi sistemi göstermektedir.



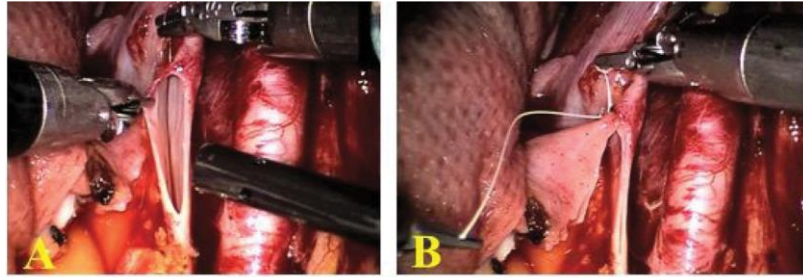
Şekil 5. Robotik cerrahi sistem (Dwivedi & Mahgoub, 2012).

Robot destekli böbrek transplantasyonunun temel cerrahi basamakları Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. (A) Göbek Boyunca 6 Cm'lik Doğrusal Bir Kesi. (B) Doğrusal Periumbilikal İnsizyonda Gelpoint Yara Retraktörünün Yerleştirilmesi. (C) Periton Boşluğuna Dört Parmakla Erişim. (D) Buzlu Bulamaçla Doldurulmuş Gazlı Bezle Sarılmış Böbreğin Sokulması. (E) Gelpoint Kapağının (Kameralı Trokar İle) Yerleştirilmesi. (F) Robotun Yeniden Yerleştirilmesi (Breda ve ark., 2018).

Venöz Anastomoz Şekil 7'de gösterilmiştir.



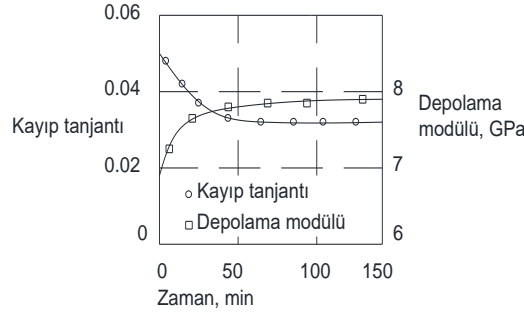
Şekil 7. Venöz Anastomoz (A) Robotik Makas Kullanarak Dış İliak Ven İnsizyonu. (B) Greft Renal Ven, Dış İliak Vene Uçtan Uca Sürekli Bir Şekilde Anastomozlanması (Breda ve ark., 2018).

Dokular ameliyatın birincil ortamıdır. Preoperatif planlamada ve cerrahi yöntemin uygulanmasında dokuların biyomekanik özellikleri önemli rol oynamaktadır. Dokular kopma uzama miktarına göre sert doku ve yumuşak doku olarak iki sınıfa ayrılır. Yumuşak dokulardan farklı olarak, sert dokular ameliyat sırasında maruz kaldıkları gerilme altında büyük uzama göstermezler. Yumuşak dokular homojen olmayan, anizotropik ve doğrusal olmayan davranışlar göstermektedir. Viskoelastik olan dokular karakteristik mekanik özellikleri bakımından önemlidir. Doku hücrelerinin hücre dışı matrisinin bileşenleri olan proteinler de viskoelastiktir. Dokuların viskoelastik yapısı onları modellemeyi zorlaştırmaktadır. Biyolojik yumuşak dokunun gösterdiği viskoelastisitenin biyomekanik mekanizmasını değerlendirmek için, model parametrelerinin yumuşak dokunun viskoelastik davranışı üzerindeki etkisi incelenmektedir (Xi ve ark., 2022).

2.2. Kemiklerin Viskoelastisitesi

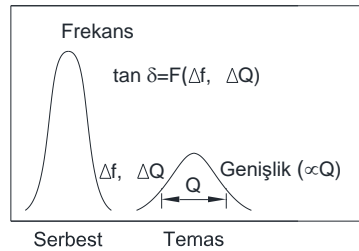
Kemikler viskoelastik davranış sergilemekte bu da gerilmenin sadece birim şekil değiştirmeye değil, aynı zamanda birim şekil değiştirmenin geçmişine de bağlı olduğu anlamına gelmektedir. Bu tür davranışlar, kendini kontrol ünitesi dalgalar, gerilimi kademeli bir düşüş ile bir örnek olarak sabit yük altında, gerilme gevşemesi; yük sertlik oranı bağımlılık; sonik ya da ultrasonik enerji

zayıflatma sürekli gerilme altında uzun sürünme ile kademeli bir artış gösteriyor veya dinamik olarak kemik kaybı yüklü olabilmektedir. Kemik çalışmasında yukarıdaki fenomenlerin her birine dayanan deneysel reoloji yöntemleri kullanılmaktadır. Sonuçların doğrudan karşılaştırılmasını sağlamak için, sonuçlar doğrusal viskoelastisite teorisinin doğasında bulunan karşılıklı ilişkiler yoluyla ortak bir temsile dönüştürülmektedir. Çekme / basma durumunda, yayınlanan sonuçlar arasında çok önemli farklar bulunmaktadır. Bu uyumsuzluğa doğrusal olmayan viskoelastik davranışlar veya dönüşüm sürecinde dikkate alınmayan deneysel sonuçlar neden olabilmektedir. Bununla birlikte, kayma şekil değiştirmesi durumunda, farklı deney türlerinde elde edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum bulunmaktadır. Bir deformasyon döngüsünde harcanan enerjinin depolanmış enerjiye oranı ile orantılı olan kayıp tanjantı 10-6 Hz ile 100 Hz arasındaki frekanslarda minimum olarak yaklaşık 0,01 değerine ulaşmaktadır. Daha düşük ve daha yüksek frekanslarda kayıp tanjantı, dolayısıyla viskoelastik etkilerin büyüklüğü daha önemli olmaktadır. Örneğin, 1 μ Hz ve 1 MHz frekansta kayıp tanjantı 0,08'dir. Polimerlerde 0,01 ila 0,1 ve yumuşak polimerlerde 1,0'dan büyük olabilmektedir. Islak bir kemik için kayıp tanjantı ve saklama modülü zamana bağlı olarak Şekil 8'de gösterilmiştir.



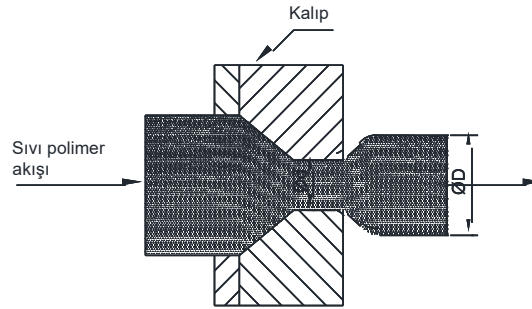
Şekil 8. Zamanın Bir Fonksiyonu Olarak Islak Kemiğin Kayıp Tanjantı ve Depolama Modülü (Yamashita ve ark., 2001)

Polimerik malzemelerin viskoelastik $\tan \delta$ kayıp tanjant değerini ölçmek için temas rezonansına dayalı atomik kuvvet mikroskobu tekniklerinin nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. Yöntem, kayıp ve depolama modüllerinin ara hesaplanmasını, kalibrasyon ölçümlerini veya geleneksel kontak rezonans ucu şekli parametre aralığının kullanılmasını gerektirir. Aralığı 0,02-0,2 aralığında bir nükleer reaksiyon ile polistiren, yüksek yoğunluklu polietilen ve iki ticari polimer, dört homojen polimer kullanılarak tasarlanan numuneler üzerinde temas rezonans deney sonuçları polimerler ve biyomateryallerin nano elastik ölçümler için temas rezonans modları potansiyelini göstermektedir. Temas durumunda ve serbest durumda, frekans Şekil 9'da verilmektedir (Hurley ve ark., 2013).



Şekil 9. Temas halinde ve serbest halde frekans. (Hurley ve ark., 2013).

Sıvı polimerin viskoelastik özelliği, kalıptan çıktığında malzemenin enine kesitinin büyümesini ifade eder (Şekil 10). Çıkış çapının kalıp çapına (D/d) oranına kabarma oranı denir. Bu oran 1'den büyüktür. Boğaz uzunluğu artarsa, şişme oranı azalır (Groover, 2010).

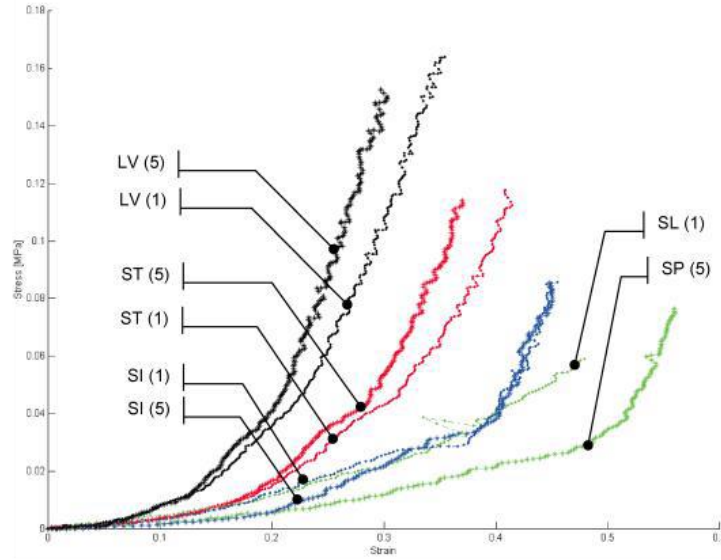


Şekil 10. Sıvı Polimerin Viskoelastik Özelliği

Kemikteki minimum enerji kaybının normal aktiviteler sırasında karakteristik bir frekans aralığında meydana gelmesi dikkat çekicidir. Vücutta birçok kas bulunduğu için, her tendonun işlevi ve dolayısıyla mekanik özellikleri farklı olmaktadır. Örneğin, insan patellar tendonunun elastiklik modülü 660 ± 266 MPa'dır, oysa tibianın ön tendonu için yaklaşık 1200 MPa değerinde bulunmaktadır. Yaşlanma ayrıca tendonların mekanik özelliklerini de önemli ölçüde etkilemektedir. 29-50 yaşlarında insan patellar tendonlarının elastiklik modülü yaklaşık 660 ± 266 MPa iken 64-93 yaşlarında yaklaşık 504 ± 222 MPa olmaktadır (Wang ve ark., 2012).

İç gerilmeler birbirine bağlı yumuşak dokularda meydana gelmektedir. Dokuların kesilmesiyle iç gerilmeler ortadan kaldırılmaktadır. Sonuç olarak, yumuşak dokunun geometrisi önemli ölçüde değişebilmektedir.

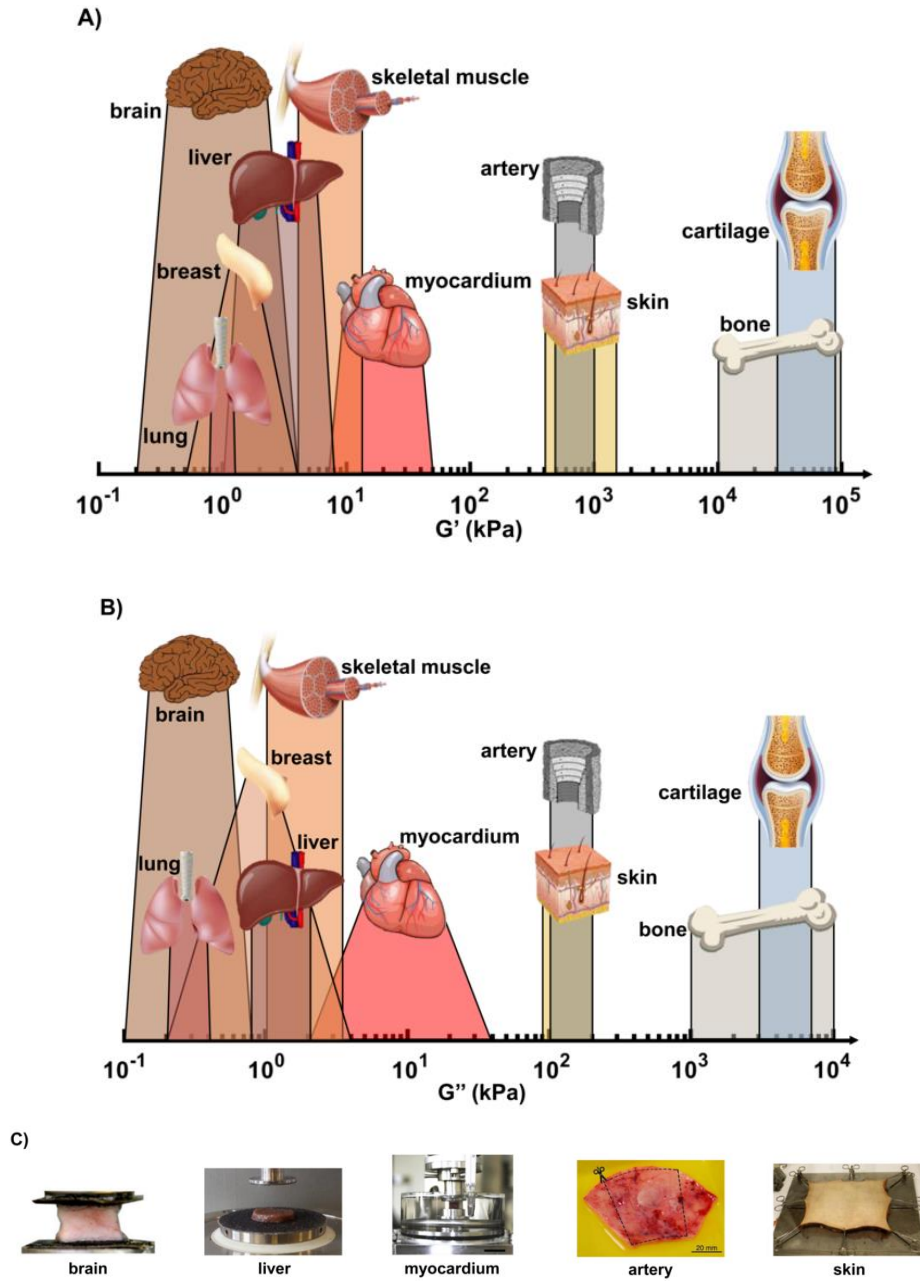
Robotik cerrahi uygulamalarına özgü deneysel doku biyomekaniğinin çeşitli yönleri ele alınmaktadır. Bunlardan biri ameliyat sırasında aletler ve doku arasındaki etkileşimler olmaktadır. Bu etkileşimler normal fizyolojik gerilmeler dışındaki gerilmelere yol açmaktadır. Örneğin, endoskopik aletlerle uygulanan bölgesel sıkıştırma ve kesme kuvvetleri iç organları etkilemektedir. Bazı iç organların gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri Şekil 11'de verilmektedir. Bu eğriler, ameliyat sırasında uygulananlara benzer yükler uygulayan bir endoskopik alet kullanılarak elde edilmektedir. Bir diğeri, in vivo, in vitro veya ex-corpore, biyomekanik özelliklerin toplandıkları koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. En doğru doku karakterizasyonunu sağlayabildikleri için in vivo veriler tercih edilmektedir. Deneysel robotik cihazlar in vivo veri toplama için tasarlanıp ve üretilmektedir. Bunlara bir örnek motorlu endoskopik kavrayıcılar olmaktadır. Robotik cerrahi doku biyomekaniğinin bir yönü, ön koşullandırma ve veri toplama öncesi dokunun tekrarlayan bir yükleme döngüsüne maruz kaldığı süreçtir. Böylece dokunun mekanik özellikleri stabilize edilir. Buna doku şartlandırma denilmektedir. Doku şartlandırmasından sonra toplanan veriler tutarlı olmasına rağmen, bunun cerrahi bağlamında geçerli olmadığı görüşü de ileri sürülmektedir (Rosen, 2013).



Şekil 11. Yumuşak Doku ve Doku Hasarının Biyomekanik Özellikleri (Rosen, 2013)

Şekil 11, yükleme hızı 5.4 mm / s olduğunda motorlu endoskopik tutucu ile ölçülen incelenen tüm organlar için gerilme-Birim şekil değiştirme eğrilerinin örneklerini göstermektedir. Birinci ve beşinci döngüler (a) in vivo ve (b) ex korpustur. Organlar: BL-mesane, GB-safra kesesi, Li-kalın bağırsak, LV-karaciğer, SI-ince bağırsak, SP-dalak ve ST-mide). Yükleme döngüsü numarası (1 veya 5) parantez içinde tanımlanır. Karaciğerin kompresyon yüklerine verdiği yanıt %40 olarak bulunmuştur (Rosen, 2013).

Şekil 12 ortak biyomalzemeler için depolama ve kayıp modülünü göstermektedir. (A) burada malzemeler için depolama modülü, beyin, burulma cihaz, aygıt miyokard üç eksenli kesme, çoklu (B) Beyin, akciğer, eksik bir modül için meme, karaciğer, iskelet kası, kalp kası, deri, damar, kırıldak ve kemik, ve (C) kesme test cihazı, deri ve kemik doku örnekleri eksen verebileceği test (Zhang ve ark., 2021).



Şekil 12. A. Biyomalzemeler için Kayma Depolama Modülü G' Değerleri B. Kayma Kaybı Modülü Değerleri G'' Değerleri C. Test Cihazı.

Kayma kaybı modülü G'' akciğerlerde en küçük ve kemiklerde en büyük olmaktadır. Ayrıca, kayma depolama modülü G' akciğerlerde en küçük ve kemiklerde en büyüktür. Kemikler için kayma kaybı modülü G'' , kayma depolama modülü G' değerinin 10 katı mertebesindedir (Şekil 12). Bu değerler arasındaki fark, dokunun yumuşak ve sert doku olmasıyla açıklanabilmektedir.

3. SONUÇLAR

Cerrahi robotlarda büyük ilerlemeler kaydedildi, uzaktan cerrahi ve minimal invaziv cerrahi mümkün oldu. Robotik kullanımı ile hassas ve daha küçük kesilerle ameliyat yapılabilir, kan kaybı azaltılabilir, daha az ağrı ve daha hızlı iyileşme süresi sağlanabilir. Kemik viskoelastik davranış sergiler, yani gerilme aynı zamanda birim şekil değiştirmenin geçmişine de bağlı olmaktadır. Polimerik malzemelerin viskoelastik kayıp tanjant değerini ölçmek için temas rezonansına dayalı

atomik kuvvet mikroskobu tekniklerinin nasıl kullanılabileceği gösterilmiştir. Kemikteki minimum enerji kaybının, normal aktiviteler sırasında karakteristik bir yük geçmişi frekans aralığında meydana gelmesi dikkat çekicidir. Islak bir kemik için kayıp tanjanti ve saklama modülü zamana bağlı olarak verilir. Vücutta birçok kas bulunduğu için, her tendonun işlevi ve dolayısıyla mekanik özellikleri farklıdır. İnsan patellar tendonunun elastiklik modülü 660 MPa olmaktadır. Tibianın ön tendonu için ise yaklaşık 1200 MPa değerini bulmaktadır. Yaşlanma, tendonların mekanik özelliklerini etkilemektedir. Biyomekanik özellikler, toplandıkları koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmekte ve mümkün olduğu ölçüde, en doğru doku karakterizasyonunu sağlayabildikleri için in vivo veriler tercih edilmektedir. İncelenen tüm organlar için belirli yüklenme hızlarında motorlu endoskopik kavrayıcı ile ölçülen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilebilmektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

- Breda, A., Territo, A., Gausa, L., Tugcu, V., Alcaraz, A., Musquera, M., Decaestecker, K., Desender, Stockle, M., Janssen, M., Fornara, P., Mohammed, N., Siena, G., Serni, S., Guirado, L., Facundo, C. & Doumerc, N. (2018). Robot-assisted Kidney Transplantation: The European Experience. *European Urology*, 73(2), 273-281.
- Chen, R., Rodrigues Armijo, P., Krause, C., Siu, K. C. & Oleynikov, D. (2020). A comprehensive review of robotic surgery curriculum and training for residents, fellows, and postgraduate surgical education. *Surg Endosc Jan*, 34(1), 361-367. doi: 10.1007/s00464-019-06775-1.
- Dialani, P. (2021). Latest News Robotics Top List, Top 10 Robotic Surgical Companies in 2021, All Over The World. <https://www.analyticsinsight.net>. adresinde 5 Mart 2021 tarihinde alınmıştır.
- Dwivedi, J. & Mahgoub, I. (2012, May, 10-11). Robotic surgery - a review on recent advances in surgical robotic systems. *Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 1-7. Boca Raton, Florida.
- Fujii K., Gras G., Salerno A. & Yang G. Z. (2017). Gaze gesture based human robot interaction for laparoscopic surgery. *Med Image Anal.*, 44, 196-214. doi: 10.1016/j.media.2017.11.011.
- Giddings, V. L., Beaupré, G. S., Whalen, R. T., & Carter, D. R. (2000). Calcaneal loading during walking and running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 32 (3), 627-34. doi:10.1097/00005768-200003000-00012.
- Graur, F., Radu, E., Al Hajjar, N., Vaida, C. & Pisla, D. (2018). Surgical Robotics—Past, Present and Future Conference Paper. *Springer International Publishing*, 159-171. DOI: 10.1007/978-3-319-59972-4_12

- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing (4th Ed.)*. John Wiley, New York.
- Hurley, D. C., Campbell, S. E., Killgore, J. P., Cox, L. M. & Ding, Y. (2013). Measurement of viscoelastic loss tangent with contact resonance modes of atomic force microscopy. *Macromolecules*, 46(23), 9396–9402. <https://doi.org/10.1021/ma401988h>.
- Kakkos, A., Eecke C. V., Ongaro, S., Traen, K., Peeters, F., Trappen, P. V., Laenen, A., Despierre, E., Nieuwenhuysen, E. V., Vergote, I. & F. Goffin, F. (2021). Robot-assisted surgery for women with endometrial cancer: Surgical and oncologic outcomes within a Belgium gynaecological oncology group cohort. *European Journal of Surgical Oncology*, 47, 1117-1123.
- Kurt, G., Akyuz, A., Seven, M., Dede, M., & Yenen, M. C. (2020). Robotic Gynecologic Surgery: What it Means for Women. *Konuralp Medical Journal*, 12(3), 473-480.
- Margueritte, F., Sallée, C., Legros, M., Lacorre, A., Piver, P., Aubard, Y., Tardieu, A. & Gauthier, T. (2020). Description of an initiation program to robotic in vivo gynecological surgery for junior surgeons. *Journal of Gynecology Obstetrics and Human Reproduction*, 49, 1-4, 101627.
- Matson, A., Konow, N., Miller, S., Konow, P. P. & Roberts, T. J. (2012). Tendon material properties vary and are interdependent among turkey hindlimb muscles. *J Exp Biol.* 15, 215(20), 3552–3558. doi: 10.1242/jeb.072728.
- Matsuo, K., Matsuzaki, S., Mandelbaum, R. S., Kanao, H., Chang, E. J., Klar, M., Roman, L. D. & Wright, J. D. (2021). Utilization and perioperative outcome of minimally invasive pelvic exenteration in gynecologic malignancies: A national study in the United States. *Gynecologic Oncology*, 161, 39–45.
- O'Brien, M. (2005). The Anatomy of the Achilles Tendon. *Foot Ankle Clin N Am* 10, 225 – 238.
- Power, N. E., Jonathan L., Silberstein, J. L., Ghoneim, T.P., Guillonneau, B. & Touijer, K. A. (2012). Environmental Impact of Minimally Invasive Surgery in the United States: An Estimate of the Carbon Dioxide Footprint. *Journal of Endourology*, 26(12), 1639–1644. DOI: 10.1089/end.2012.0298.
- Research and Markets (2021). Global Surgical Robotics Market 2021-2031: Focus on Vendor Analysis, Key Enabling Technologies, Emerging Platforms in Pipeline, 26 Company Profiles, and 45 Countries Data & Cross Segmentation. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5318090/global-surgical-robotics-market-2021-2031-focus> adresinden 25 Haziran 2021 tarihinde alınmıştır.
- Robotik Cerrahi (2021). <https://www.saglikteknoloji.com>robotik-cerrahi-yapan-hastaneler-listesi> adresinden 25 Haziran 2021 tarihinde alınmıştır.
- Rosen, J. (2013). *Medical Devices: Surgical and Image Guided Technologies (First Ed.)* Edited by Martin Culjat, Rahul Singh and Hua Lee. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Sánchez, A. B., Abián, P., Jimenez, F., & Javier Abián-Vicén, J. V. (2021). Structural and mechanical properties of the Achilles tendon in senior badminton players: Operated vs. non-injured tendons. *Clinical Biomechanics*, 85, 105366.

- Siaulysa, R., Klimasauskienea, V., Janusonisa, V., Ezerskienea, V., Narimantas, Dulskasb, A. & Samalaviciusa, N. E. (2021). Robotic gynaecological surgery using Senhance® robotic platform: Single centre experience with 100 cases. *J Gynecol Obstet Hum Reprod*, 50, 102031.
- Standring S, Borley NR, eds. (2008). Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice. Amis A, Bull A, Gupte CM (40th ed.). *Churchill Livingstone*. London.
- Stecco, C., Pirri, C., Fede, C., Yucesoy, C.A., De Caro, R. & Stecco, A. (2021). Fascial or Muscle Stretching? *A Narrative Review. Appl. Sci.* 11, 307.
- Wang, J. H-C., Guo, Q. & Li, B. (2012). Tendon biomechanics and mechanobiology - a mini-review of basic concepts and recent advancements. *Journal of Hand Therapy*, 25(2), 133–141.
- Wang, L., Yan, P., Yao, L., Liu, R., Hou, F., Chen, X., Han, L., Xu, L., Xu, H., Jing Li, J., Guo, T., Yang, K. & Wang, H. (2020). Evaluation of intra- and post-operative outcomes to compare robot-assisted surgery and conventional laparoscopy for gynecologic oncology. *Asian Journal of Surgery*. 43, 347-353.
- Xi, M, Yun G, & Narsu B. (2022). A mathematical model for viscoelastic properties of biological soft tissue. *Theory Biosci.* 141(1), 13-25.
- Yamashita, J., Furman, B. R., Rawls, H. R., Wang, X. & Agrawal, C. M. (2001). The use of dynamic mechanical analysis to assess the viscoelastic properties of human cortical bone. *Journal of Biomedical Materials Research*, 58(2), 47–53.
- Yazıcıoğlu, O. & Borat, O. (2021, Eylül, 7-8). Robotik cerrahi uygulamalarının incelenmesi. 15. *Uluslararası MAS Uygulamalı Bilimler Kongresi*, Adana.
- Zhang, W., Capilnasiu, A. & Nordsletten, D. (2021). Comparative analysis of nonlinear viscoelastic models across common biomechanical experiments. *Journal of Elasticity*, 145, 117–152.