



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances
in Engineering and Pure Sciences

MARMARA JEPS



In the name of Rectorate of Marmara University, Rector

Prof. Dr. Mustafa KURT

In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, Director

Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editor-in-Chief

Assoc. Prof. Dr. Beste TURANLI

Associate Editors

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Assoc. Prof. Dr. Ceyhan BEREKETOĞLU,

Assist. Prof. Dr. Merve ER

Editorial Boards

Assoc. Prof. Dr. Ali İmran AYTEN
Mechanical Engineering

Assist. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Chemical Engineering

Prof. Dr. Bülent Oktay AKKOYUNLU
Physics

Assist. Prof. Dr. Mustafa Alparslan ZEHİR,
Electrical and Electronics Engineering

Assoc. Prof. Dr. Esra ERKEN,
Environmental Engineering

Assoc. Prof. Dr. Sefa Anıl SEZER,
Mathematics

Assist. Prof. Dr. Batuhan ÖZKAN,
Statistics

Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN,
Industrial Engineering

Assist. Prof. Dr. Buğrayhan BİÇKİCİ,
Civil Engineering

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Mathematics

Assist. Prof. Dr. Sanem ARSLAN YILMAZ,
Computer Science and Engineering

Assoc. Prof. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biology

Assoc. Prof. Dr. Ali DOĞRUL,
Fluid Dynamics

Assoc. Prof. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Electrochemical Technologies

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ
Electrical Engineering

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Avni ES,
Industrial Engineering

Assist. Prof. Dr. Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Architecture and Civil Engineering

Assoc. Prof. Dr. Arzum ÖZGEN,
Industrial Engineering

Publishing Editor

Oğuz Eren SÜSLÜ

Correspondance and Communication

Beste TURANLI

Bioengineering, Faculty of Engineering,
M2-231 Maltepe /İSTANBUL

Tel: +90 216 777 0 777

beste.turanli@marmara.edu.tr

Publisher

Marmara University Press
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/İSTANBUL

Tel: +90 216 777 1408

yayinevi@marmara.edu.tr

Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, Rektör
Prof. Dr. Mustafa KURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, Müdür
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editör

Doç. Dr. Beste TURANLI

Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Doç. Dr. Ceyhan BEREKETOĞLU,
Dr. Öğr. Üyesi Merve ER

Editörler Kurulu

Doç. Dr. Ali İmran AYTEN
Makine Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Berçem KIRAN YILDIRIM,
Kimya Mühendisliği

Prof. Dr. Bülent Oktay AKKOYUNLU
Fizik

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alparslan ZEHİR,
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Doç. Dr. Esra ERKEN,
Çevre Mühendisliği

Doç. Dr. Sefa Anıl SEZER,
Matematik

Dr. Öğr. Üyesi Batuhan ÖZKAN,
İstatistik
Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Buğrayhan BİÇKİCİ,
İnşaat Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Matematik

Dr. Öğr. Üyesi Sanem ARSLAN YILMAZ,
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Doç. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biyoloji

Doç. Dr. Ali DOĞRUL,
Akışkanlar Dinamiği

Doç. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Elektrokimyasal Teknolojiler

Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ
Elektrik Mühendisliği

Doç. Dr. Hüseyin Avni ES,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

Doç. Dr. Arzum ÖZGEN,
Endüstri Mühendisliği

Yayın Editörü Oğuz Eren SÜSLÜ

Yazışmalar ve İletişim

Beste TURANLI
Biyomühendislik,
Mühendislik Fakültesi, M2-
231 Maltepe / İSTANBUL
Tel: +90 216 777 0 777
beste.turanli@marmara.edu.tr

Yayımcı

Marmara Üniversitesi Yayınevi
Göztepe Kampusu 34722
Kadıköy / İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

1. Türkiye’deki İş Kazası İstatistiklerinin Logaritmik Doğrusal Modeller ile Çözümlemesi

Simge KAVAK, Ayfer Ezgi YILMAZ ÇAKIROĞLU

Sayfa/Page: 92 – 108

2. Yeni Nesil Akıllı Kişisel Koruyucu Donanımların Sektörel Kullanımına Yönelik Niteliksel Bir İnceleme

Ahmet ÇABUK, Hızircan KARTAL, Enes Said KARATAŞ, Eray ŞEKER, Sıla ÖZKAYA, Maral ENGİN, Zeynep Nur SALKIN, Saadet KARAKUŞ, Serap TEPE

Sayfa/Page: 109 – 123

3. Elektrikli Araç Şarj İstasyonları İçin Yüksek Verimli AA-DA Dönüştürücü Topolojileri ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Harmonik Bozunum Tahmini

Murat ÜNLÜ, Ahmet BÜYÜKDAĞ

Sayfa/Page: 124 – 132

4. A CBAM-Enhanced UNetFormer for Semantic Segmentation of Wheat Yellow-Rust Disease Using Multispectral Remote Sensing Images

İrem ÜLKÜ

Sayfa/Page: 133 – 143

5. The Evaluation of Methane Gas Explosion Risk in Confined Spaces – A Case Study in the Ship Building Industry

Ferdi ÇALIK

Sayfa/Page: 144 – 152

6. İşe Bağlı Stres, Tükenmişlik ve İş Tatmininin İş Güvenliği Uzmanlarına Etkisi: YEM ve Yol Analizi Yöntemlerinin Kullanılması

Ahmet Ebrar SAKALLI, Sertaç TEMUR, Zeynep Feride OLCAY

Sayfa/Page: 153 – 165

7. Acil Durum Çağrı Merkezi Uygulamalarında Kullanıcı Memnuniyeti ve Performans Analizi: 112 Örneği

Yusuf SELİMDAROĞLU, Özgür TONKAL

Sayfa/Page: 166 – 187

8. Correlation between Spheroid Formation Ability and Reported Invasiveness of HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa Cancer Cell Lines in Commercial Well Plates

İsmail EŞ

Sayfa/Page: 188 – 195

9. EkoBot: Türkçe Destekli Akıllı Sanal Akademik Danışman

Ayça KUMLUCA TOPALLI

Sayfa/Page: 196 – 205

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

10. Düşük Maliyetli GNSS ve IMU Verilerinin Entegrasyonu: Uygulama Örneği

Ramazan Alper KUÇAK, Aysan ŞAHİN

Sayfa/Page: 206 – 215

11. The Effect of the Pandemic on the Carbon Footprint of Health Care Institutions: A Case Study

Senem TEKSOY BAŞARAN, Mehmed Kamil İLTER

Sayfa/Page: 216 – 223

Türkiye’deki İş Kazası İstatistiklerinin Logaritmik Doğrusal Modeller ile Çözümlemesi

Analysis of Work Accident Statistics in Turkey with Logarithmic Linear Models

Simge KAVAK ¹ , Ayfer Ezgi YILMAZ ÇAKIROĞLU ² 

¹Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

²Hacettepe Üniversitesi, İstatistik Bölümü, Ankara, Türkiye

Öz

İş kazaları, çalışanların iş yerinde görevlerini yerine getirirken karşılaştıkları ve genellikle ölümlü ya da yaralanmalı olarak sonuçlanan beklenmedik olaylardır. Bu kazalar, iş güvenliği önlemlerinin yetersizliği, yanlış uygulamalar veya kişisel hatalardan kaynaklanarak meydana gelebilirler. İş kazaları öncelikle çalışanların sağlık ve güvenliğini tehlikeye atmakta olup iş yerindeki verimliliğin düşmesine de neden olmaktadır. Aynı zamanda ekonomik ve sosyal yapılar üzerinde de olumsuz sonuçlar yaratmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de iş kazaları önemli bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye örneği üzerinden logaritmik doğrusal modeller analizi gerçekleştirilerek 2013, 2016, 2019 ve 2022 yıllarında meydana gelen iş kazaları ele alınmış; sektörler arası farklılıklar, demografik özellikler ve çevresel faktörlerin iş kazalarının ölümle sonuçlanma olasılıkları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. İlgili yıllara ait iş kazası istatistikleri incelendiğinde, 2013 yılından 2022 yılına kadar iş kazası geçirme oranlarında belirgin bir artış yaşandığı fakat iş kazası sonucunda ölüm riskinin azaldığı söylenebilir. Elde edilen bulgular neticesinde, 2022 yılında bir iş kazasının ölümle sonuçlanması riskinin erkeklerde kadınlara göre 9,23 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. 60 yaş ve üzeri olan işçilerin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riskinin diğer yaş gruplarına göre daha fazla olduğu, ilgilenilen yıllarda en yüksek iş kazası oranının madencilik ve taş ocaklığı sektöründe meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İş kazası, İş güvenliği, Logaritmik doğrusal modeller, Odds oranları

Abstract

Work accidents are unexpected events that employees encounter while performing their duties at the workplace, often resulting in fatalities or injuries. These accidents may occur due to inadequate work safety measures, incorrect practices, or personal errors. Work accidents primarily threaten the health and safety of employees and cause a decrease in productivity in the workplace. It also creates negative consequences on economic and social structures. As in the world, work accidents represent a significant issue in Turkey, as well. In this study, a logarithmic linear model analysis was conducted using the Turkish case, focusing on work accidents occurring in 2013, 2016, 2019, and 2022. The impact of sectoral differences, demographic characteristics, and environmental factors on the likelihood of fatal outcomes of these accidents was evaluated. When the work accident statistics for the relevant years are analyzed, it can be said that there has been a significant increase in the rates of work accidents from 2013 to 2022, but the risk of death as a result of work accidents has decreased. The findings revealed that, it was observed that the risk of a work accidents resulting in death in 2022 was 9.23 times higher for men than for women. Workers aged 60 and above had a higher risk of fatality in occupational accidents compared to other age groups. It was also observed that the highest rates occurred in the mining and quarrying sector during the years studied.

Keywords: Occupational accident, Occupational safety, Logarithmic linear models, Odds ratios

1. GİRİŞ

İş kazaları, her yıl milyonlarca çalışanı etkilemektedir ve bu nedenle çalışma hayatının en önemli sorunlarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. İş kazaları, bireylerin hayatını tehdit etmenin yanı sıra ekonomik ve sosyal yapılar üzerinde de olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. İş kazalarının önlenmesi ve güvenli bir çalışma ortamı sağlanarak çalışanların korunması işverenlerin temel görevlerinden biridir.

Teknolojideki yenilikler ve gelişmeler ile birlikte üretim ve rekabet giderek artmaktadır. Bu artış, çalışanların sağlığını ve iş güvenliğini olumsuz olarak etkilemektedir [1]. Genellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde yaygın olarak meydana gelen iş kazaları, can ve mal kayıplarına yol açarak çalışan kişiye, işverene ve ülkenin ekonomisine zarar vermektedir [2].

İş kazaları, iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin yeteri kadar alınmadığı koşullar göz önüne alınarak, insan davranışlarına bağlı ya da fiziksel ve mekanik çevre koşullarına bağlı nedenlerden kaynaklanabilmektedir. İnsan davranışına bağlı kazalar, kaza geçiren kişinin kişisel özelliklerine (yaş, cinsiyet, eğitim durumu, vb.), fizyolojik faktörlere (fiziksel yetersizlikler, yorgunluk, uykusuzluk, vb.) ya da psikolojik faktörlere bağlı olabilmektedir. Fizik ve mekanik çevre koşullarına bağlı nedenler ise makineler, üretim organizasyonlarına (iş yeri düzeni, işletme büyüklüğü, vb.) ve çevresel nedenlere (gürültü, ısı, nem, aydınlatma, vb.) bağlı olabilmektedir [3]. Kişiler, geçirdikleri iş kazaları sonucunda çalışmalarını sürdürebilir ya da iş göremez durumda olabilir. Bununla birlikte ölümle sonuçlanan iş kazalarının sayısı da azımsanamayacak düzeydedir. Ortaya çıkan iş kazalarının sebepleri belirlenerek uygun çözüm önerileri sunulabilmektedir [4]. Dolayısıyla, iş sağlığı ve güvenliği için alınacak önlemler ve yapılacak çalışmalar, çalışanların güvenliğini sağlamakla birlikte işyerindeki verimliliği artıracağından ekonomik büyümeye de katkıda bulunacaktır.

Dünder ve arkadaşları [5] çalışmada, Türkiye’de meydana gelen yaralanmalı iş kazaları sektörler bazında ele alınarak kaza olabilirlik oranlarına göre en riskli sektörün kömür ve linyit madenciliği olduğu belirlenmiştir. Karakurt ve Özbakır [6] çalışmada, Türkiye’de 2013-2022 yılları arasındaki iş kazalarının kökenlerini araştırarak bu iş kazalarının nerede ve nasıl meydana geldiğini açıklamıştır. Bu bulgular sonucunda, iş kazalarının oluşumunda etkili olan unsurlar belirlenerek yeni bir iş kazasının meydana gelmesinin önüne geçilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, 2013, 2016, 2019 ve 2022 yıllarında gerçekleşen iş kazaları dikkate alınmıştır. İş kazasının sonucuna (ölümlü-yaralanmalı), demografik özelliklerin (yaş ve cinsiyet), çalışılan sektörün ve çevresel etkenlerin (bölge ve mevsim) etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, 1) ilgilenilen özellikler bakımından Türkiye’deki iş kazalarının ölümle sonuçlanması risklerini karşılaştırmak, 2) hangi demografik grupların ve sektörlerin daha yüksek risk altında olduğunu ortaya koymak, 3) yıllara göre risk faktörlerini karşılaştırmak, 4) iş güvenliği önlemlerinin hangi alanlarda ve gruplarda daha etkili olması gerektiğine dair somut veriler sunmak amaçlanmıştır. 2013-2022 yıllarındaki değişimlerin karşılaştırılması, kullanılan logaritmik doğrusal modeller ile değişkenler

arasındaki ilişkilerin ve iş kazalarının ölümle sonuçlanması risklerinin detaylı olarak ortaya konulması çalışmanın özgün katkılarıdır.

Türkiye’deki iş kazası istatistikleri 2. Bölüm’de yorumlanmıştır. 3. Bölüm’de üç boyutlu tablolarda kullanılan logaritmik doğrusal (log-doğrusal) modeller tanıtılmış ve bu modellerin sonuçları tartışılmıştır. 4. Bölümde ise bulgular ve tartışma yer almaktadır.

II. TÜRKİYE’DEKİ İŞ KAZASI İSTATİSTİKLERİ

2.1. İş Kazası Oranları

Türkiye’de iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı yıllar geçtikçe geliştirilmektedir. Mevzuattaki bu gelişmeler, işverenlerin alması gereken zorunlu tedbirleri de arttırmıştır. 2013 yılında 192.749 ölümlü-yaralanmalı iş kazası meydana gelirken, 2022 yılında bu sayı 590.340’a yükselmiştir. 2013’ten 2022 yılına doğru alınan tedbirlerle beraber, ölümle sonuçlanan iş kazalarında azalma meydana gelmiştir. 2013 yılında gerçekleşen iş kazalarının %7,1’i ölüm ile sonuçlanırken 2022 yılında bu oran %2,6’ya düşmüştür. 2013-2022 yıllarında sektörlere göre iş kazalarının gerçekleşme oranları ve iş kazası sonucunda ölüm oranları Tablo 1’de verilmiştir. İncelenen tüm yıllarda en yüksek iş kazası madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe gözlemlenmiştir. Bu sektörü 2013 yılında imalat sektörü takip etmiştir. Sektörlerin çoğunda iş kazalarının gerçekleşme oranları 2013’ten 2022’ye doğru artmıştır. Tarım, ormancılık ve balıkçılık, su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri, inşaat, bilgi ve iletişim, finans ve sigorta faaliyetleri, gayrimenkul faaliyetleri, kültür, sanat, eğlence, dinlence ve spor, hane halklarının işverenler olarak faaliyetleri ve uluslararası örgütler ve temsilciliklerinin faaliyetlerinde 2019’dan 2022’ye geçişte iş kazası gerçekleşme oranları azalmıştır. Tarım, ormancılık ve balıkçılık, imalat, inşaat ve ulaştırma-depolama gibi risk faktörü fazla olan sektörlerde yıllara göre gerçekleşen iş kazasının ölümle sonuçlanması oranları azalmıştır. Madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe ise 2013 yılında iş kazasının ölümle sonuçlanması oranı %6 iken, bu oran 2016 yılında %7’ye çıkmış, 2019 yılında %3,4’e gerilemiştir. 2022 yılında ise bu oran %5,4’e çıkmıştır [7].

2013-2022 yıllarında yaş gruplarına göre iş kazası gerçekleşmesi ve iş kazası sonucunda ölüm oranları Tablo 2’de verilmiştir. Tüm yaş gruplarında, sigortalı çalışanların iş kazası geçirmesi oranlarının 2013 yılından 2022 yılına doğru arttığı, buna karşılık, iş kazası geçirme sonucunda ölüm oranlarının düştüğü söylenebilir. 2022 yılında 14-19 yaş grubundaki çalışanların %8,06’sı iş kazası geçirmiş ve bu kazaların %1’i ölümle sonuçlanmıştır. 60 yaş ve üzeri çalışanların ise %6,28’i iş kazası geçirmiş ve bu kazaların %2,26’sı ölümle sonuçlanmıştır [7].

Tablo 1. 2013-2022 yıllarında sektörlere göre iş kazası gerçekleşme ve iş kazası sonucunda ölüm oranları (%)

Sektör	İş Kazası				Ölüm			
	2013	2016	2019	2022	2013	2016	2019	2022
Tarım, ormancılık ve balıkçılık	1,27	1,92	2,61	2,53	1,36	0,92	0,84	0,77
Madencilik ve taş ocaklığı	10,04	9,03	10,62	12,32	0,60	0,70	0,34	0,54
İmalat	2,81	3,76	4,85	5,77	0,29	0,20	0,11	0,12
Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı	0,78	1,78	3,58	4,89	1,24	0,85	0,53	0,42
Su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri	1,56	4,29	6,25	5,86	1,02	0,45	0,31	0,35
İnşaat	1,51	2,41	3,74	3,60	1,90	1,10	0,77	0,65
Toptan ve perakende ticaret, motorlu kara taşıtlarının ve motosikletlerin onarımı	0,54	0,79	1,14	1,38	0,82	0,55	0,29	0,29
Ulaştırma-depolama	1,83	2,27	3,17	3,59	1,40	1,17	0,75	0,65
Konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri	1,58	2,26	4,52	5,08	0,16	0,19	0,07	0,09
Bilgi ve iletişim	0,13	0,28	0,44	0,40	1,32	0,91	0,10	0,62
Finans ve sigorta faaliyetleri	0,12	0,21	0,36	0,31	0,00	0,57	1,06	0,00
Gayrimenkul faaliyetleri	0,10	0,40	0,76	0,74	3,03	0,69	0,57	0,94
Mesleki, bilimsel ve teknik faaliyetler	0,27	0,46	0,62	0,75	1,16	0,80	0,40	0,43
İdari destek ve hizmet faaliyetleri	0,57	1,23	2,04	2,27	0,74	0,46	0,23	0,16
Kamu yönetimi ve savunma, zorunlu sosyal güvenlik	1,54	0,60	1,02	1,34	2,29	1,31	0,54	0,43
Eğitim	0,14	0,63	1,27	1,34	0,42	0,19	0,08	0,09
İnsan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri	0,42	1,32	2,24	2,69	0,66	0,21	0,04	0,08
Kültür, sanat, eğlence, dinlence ve spor	0,29	0,60	1,77	1,04	0,00	0,74	0,14	0,11
Diğer hizmet faaliyetleri	0,73	0,93	0,68	0,64	0,49	0,30	0,32	0,68
Hane halklarının işverenler olarak faaliyetleri	0,14	0,35	0,52	0,12	3,33	0,00	0,00	0,00
Uluslararası örgütler ve temsilciliklerinin faaliyetleri	0,33	0,18	0,43	0,42	9,09	0,00	0,00	0,00

2022 yılında gerçekleşen iş kazalarının %37’si 20-29 yaş grubundakiler ve %26’sı 30-39 yaş grubundakilerdir. 60 yaş üstü çalışanların payı %1’dir.

Ölümle sonuçlanan iş kazalarının ise %28’i 40-49 yaş grubunda, %24’ü 50-59 yaş grubunda meydana gelmiştir [7].

Tablo 2. 2013-2022 yıllarında yaş gruplarına göre iş kazası geçirme ve iş kazası sonucunda ölüm olasılıkları (%)

Yaş	İş Kazası				Ölüm			
	2013	2016	2019	2022	2013	2016	2019	2022
14-19	2,26	3,62	7,33	8,06	0,57	0,22	0,10	0,10
20-29	1,77	2,29	3,34	4,08	0,42	0,28	0,13	0,12
30-39	1,47	1,94	2,63	2,84	0,58	0,37	0,19	0,19
40-49	1,26	1,73	2,41	2,65	1,07	0,67	0,39	0,34
50-59	1,27	2,17	3,18	3,43	2,77	1,81	0,98	0,83
60 ve üzeri	1,35	2,68	4,39	6,28	7,03	4,09	2,83	2,26

2.2. Verilerin Tanıtılması

İstatistiksel analizlerde kullanılan tüm veriler Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistik Yıllıklarından alınmıştır [7].

Yıllara göre ölümlü-yaralanmalı iş kazası sayıları Tablo 3’te özetlenmiştir. 2013 ve 2016 yıllarında sırasıyla 192.749 ve 287.473 ölümlü-yaralanmalı iş kazası meydana gelmiştir. Bu sayı 2019 yılında

423.610’a, 2022 yılında ise 590.340’a yükselmiştir. Yıllara göre ölümle sonuçlanan iş kazalarında azalma olmuştur. 2013 yılında gerçekleşen iş kazalarının %7,1’i ölüm ile sonuçlanmıştır. 2016 yılında ise bu sayı %4,9’a, 2019 yılında %2,7’ye, 2022 yılında ise %2,6’ya düşmüştür.

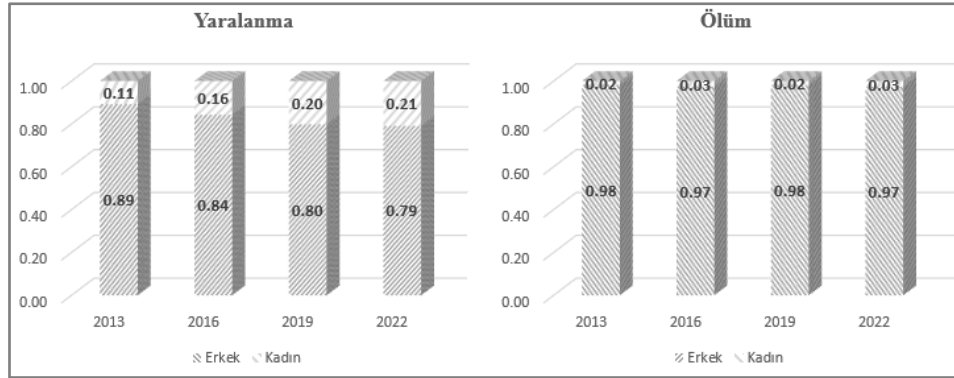
İş kazası sonucu ve yıllara göre cinsiyet dağılımları Şekil 1’de özetlenmiştir. 2013 yılında yaralanma ile

sonuçlanan iş kazası geçirenlerin %11’i kadınsa, bu değeri 2022 yılında %21’e yükselmiştir. 2013 yılında

ölüm ile sonuçlanan iş kazası geçirenlerin %98’i erkekken, bu değeri 2022 yılında da %97’dir.

Tablo 3. Yıllara göre ölümlü-yaralanmalı iş kazalarının dağılımları

Yıllar	Yaralanmalı	Ölümlü	Toplam
2013	191.389 (%99,29)	1.360 (%0,71)	192.749
2016	286.068 (%99,51)	1.405 (%0,49)	287.473
2019	422.463 (%99,73)	1.147 (%0,27)	423.610
2022	588.823 (%99,74)	1.517 (%0,26)	590.340



Şekil 1. İş kazası sonucu ve yıllara göre cinsiyet dağılımları (%)

İş kazası geçiren kişinin cinsiyeti ve yıllara göre iş kazası sonuçlarının dağılımları Tablo 4’te özetlenmiştir. 2013 yılında kadınların geçirdiği iş kazalarının %7,8’i ölümle sonuçlanırken, 2022 yılında bu değeri %3,2’ye düşmüştür. 2013 yılında erkeklerin

geçirdiği iş kazalarının %1,2’si ölümle sonuçlanırken, 2022 yılında %0,3’e düşmüştür. Genel olarak 2019 ve 2022 yıllarında ölümle sonuçlanma yüzdeleri önceki yıllara göre daha düşüktür.

Tablo 4. Cinsiyet ve yıllara göre iş kazası sonuçlarının dağılımları

Yıllar	Kadın			Erkek		
	Yaralanmalı	Ölümlü	Toplam	Yaralanmalı	Ölümlü	Toplam
2013	20.745 (%99,22)	24 (%0,78)	20.769	170.644 (%99,88)	1.336 (%0,12)	171.980
2016	44.953 (%99,44)	36 (%0,56)	44.989	241.115 (%99,92)	1.369 (%0,08)	242.484
2019	85.355 (%99,67)	21 (%0,33)	85.376	337.108 (%99,98)	1.126 (%0,02)	338.234
2022	123.054 (99,68)	39 (%0,32)	123.093	465.769 (%99,97)	1.478 (%0,03)	467.247

Bu çalışmada iş kazası geçiren kişinin cinsiyeti ve kaza sonucuna ek olarak kaza geçiren kişinin yaşı, çalıştığı sektör, çalıştığı bölge ve kazanın meydana geldiği mevsim de dikkate alınmıştır. Yaş, sektör, bölge ve mevsim değişkenlerinin düzeyleri aşağıdaki gibidir:

Değişken Düzeyleri:

Yaş: (1) 14 – 19, (2) 20 – 29, (3) 30 – 39, (4) 40 – 49, (5) 50 – 59, (6) 60+

Sektör: (A) Tarım, ormancılık ve balıkçılık, (B) Madencilik ve taş ocaklığı, (C) İmalat, (D) Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, (E) Su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri, (F) İnşaat, (G) Ulaştırma-depolama, (H) Konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri, (I) İnsan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri

Bölge: TR1: İstanbul; TR2: Batı Marmara, TR3: Ege, TR4: Doğu Marmara, TR5: Batı Anadolu, TR6: Akdeniz, TR7: Orta Anadolu, TR8: Batı Karadeniz, TR9: Doğu Karadeniz, TRA: Kuzeydoğu Anadolu, TRB: Ortadoğu Anadolu, TRC: Güneydoğu Anadolu

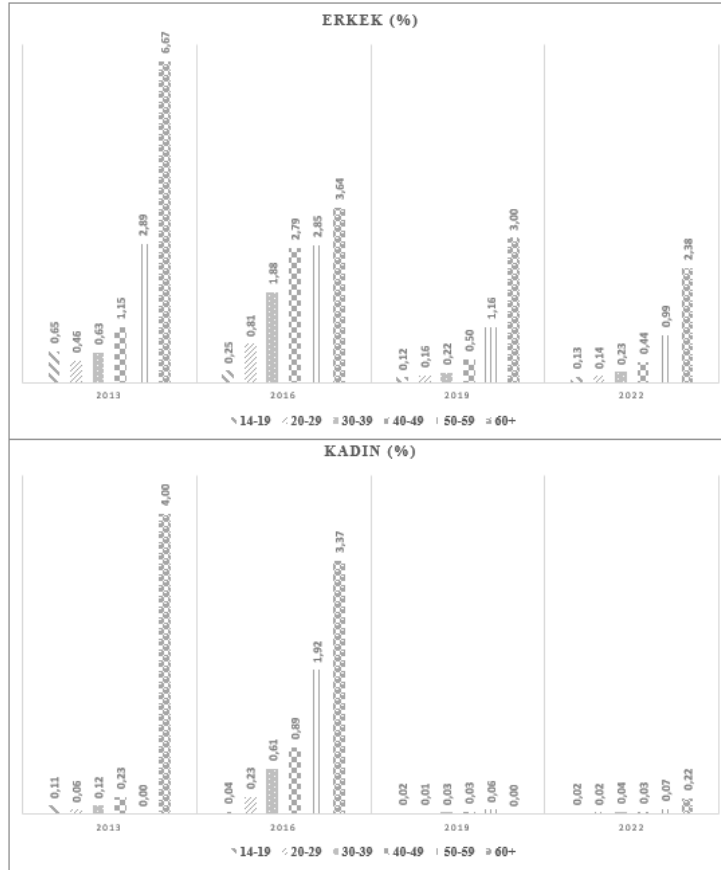
Mevsim: (1) İlkbahar, (2) Yaz, (3) Sonbahar, (4) Kış

Sektör sınıflandırması yapılırken Ekonomik Faaliyet Sınıflaması (NACE Rev. 2) dikkate alınmıştır [8]. Tanımlı sektörler içerisinde iş kazalarının dört yılın ortalaması bakımından en çok gerçekleştiği dokuz sektör seçilmiştir. Bölge sınıflandırması yapılırken 1. Düzey İstatistik Bölge Birimleri Sınıflandırılması dikkate alınmıştır [9]. Yaş sınıflandırması yapılırken Öztürk ve Akın [10] çalışması dikkate alınmıştır.

Yaş gruplarında ölümle sonuçlanan iş kazası oranları (%) Şekil 2’de özetlenmiştir. 14-19 yaş arasındaki erkeklerin geçirdiği iş kazalarının ölümle sonuçlanması oranı 2013 yılında %6,5 iken bu değer 2022’de %1,3’e düşmüştür. 2019 ve sonrasında, 20-59 yaş arasındaki erkeklerde ölümle sonuçlanan iş kazaları önceki yıllara göre önemli düzeyde azalmıştır. 60 yaş ve üzeri erkeklerde ise ölümle sonuçlanan iş kazası oranları 2013’ten 2022’ye doğru azalmıştır. 2013 yılında, 60 yaş ve üzeri kadınlarda iş kazalarının ölümle sonuçlanması oranı %4 ile en yüksek olarak gözlemlenmiştir. Genel olarak kadınlarda ölümle

sonuçlanan kaza oranı 2013’ten 2016’ya geçerken artmış fakat 2016 sonrasında oldukça azalmıştır.

Sektörlerde ölümle sonuçlanan iş kazası olasılıkları (%) Şekil 3’te özetlenmiştir. 2013 yılında erkeklerde iş kazası sonucu ölüm olasılığının en yüksek olduğu sektörler sırasıyla inşaat, tarım, ormancılık ve balıkçılık ve ulaştırma-depolama sektörleridir. Ölüm olasılığı en düşük olan sektör ise konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri sektörüdür.



Şekil 2. Yaş gruplarında ölümle sonuçlanan iş kazası olasılıkları (%)

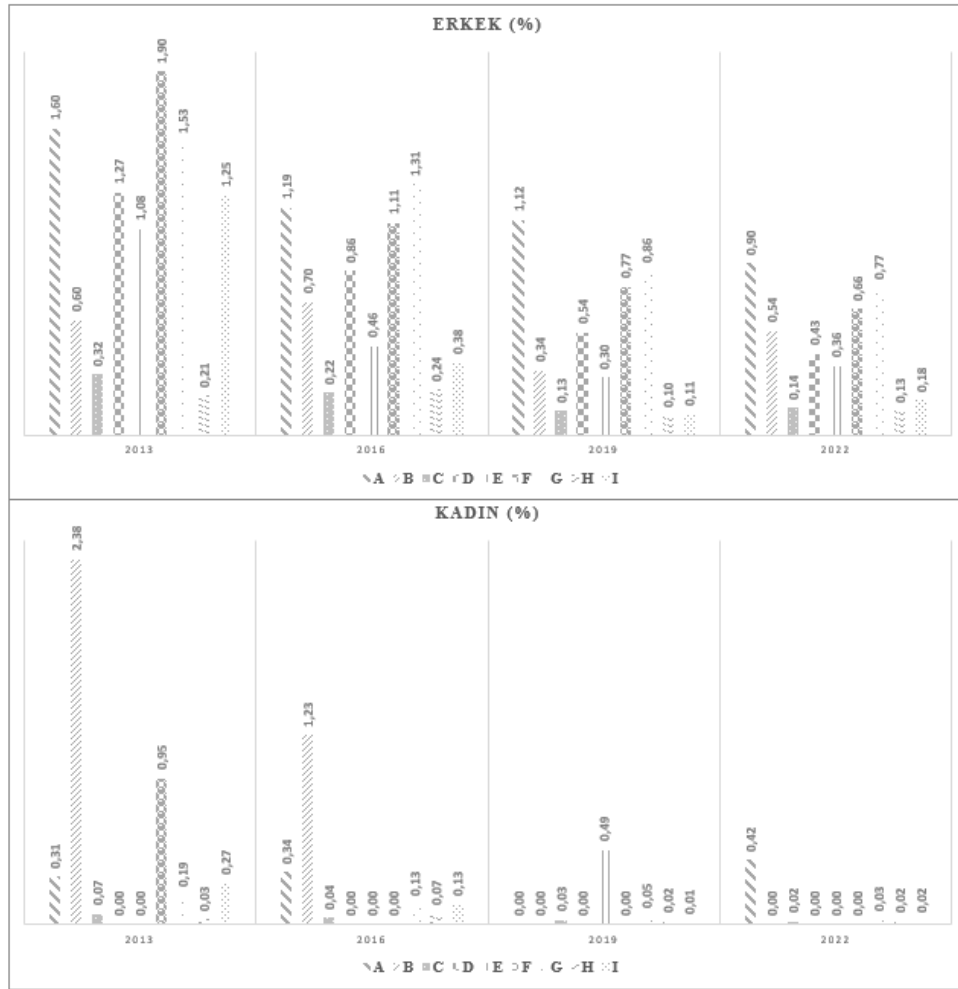
2013 yılında inşaat sektöründe iş kazası geçiren birinin kaza sonucunda ölme olasılığı %1,9 iken bu olasılık 2022 yılında %6,6’ya düşmüştür. Benzer biçimde 2013 yılında tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe iş kazası geçiren birinin kaza sonucunda ölme olasılığı %1,6 iken bu olasılık 2022 yılında %9’a düşmüştür. 2013 yılından 2022 yılına doğru tarım, ormancılık ve balıkçılık, elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, inşaat, ulaştırma-depolama, idari destek ve hizmet faaliyetleri ve eğitim sektörlerinde çalışanların iş kazası sonucunda ölüm olasılıkları düşmüştür. 2019 yılında madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe iş kazası geçiren birinin kaza sonucunda ölme olasılığı %3,4 iken bu olasılık 2022 yılında %5,4’e yükselmiştir. Benzer bir biçimde, su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri,

konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri ve insan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri sektörlerinde de iş kazası geçiren birinin kaza sonucunda ölme olasılığı her ne kadar 2013’e göre düşmüş olsa da 2019’dan 2022’ye geçerken artmıştır.

Kadınlarda 2013 ve 2016 yılında iş kazası sonucu ölüm olasılığının en yüksek olduğu sektör madencilik ve taş ocakçılığı sektörü olarak görülmektedir. Bunun sebebi bu sektörde çalışan kadın sayısının, dolayısıyla iş kazası geçiren kadın sayısının çok az olmasıdır. 2013 yılında madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe iş kazası geçiren 42 kadın çalışandan bir tanesi ölümlü iş kazası geçirmiştir. Dolayısıyla bu olasılık %2,38 olarak bulunmuştur. 2019 ve 2022 yıllarında bu sektörde olup iş kazası sonucunda ölen kadın bulunmamaktadır. 2013

ve 2022 yılları karşılaştırıldığında, genel olarak tarım, ormancılık ve balıkçılık sektörü dışında tüm sektörlerde kadınların iş kazası sonucu ölüm olasılığı azalmıştır. 2013 yılında tarım, ormancılık ve balıkçılık

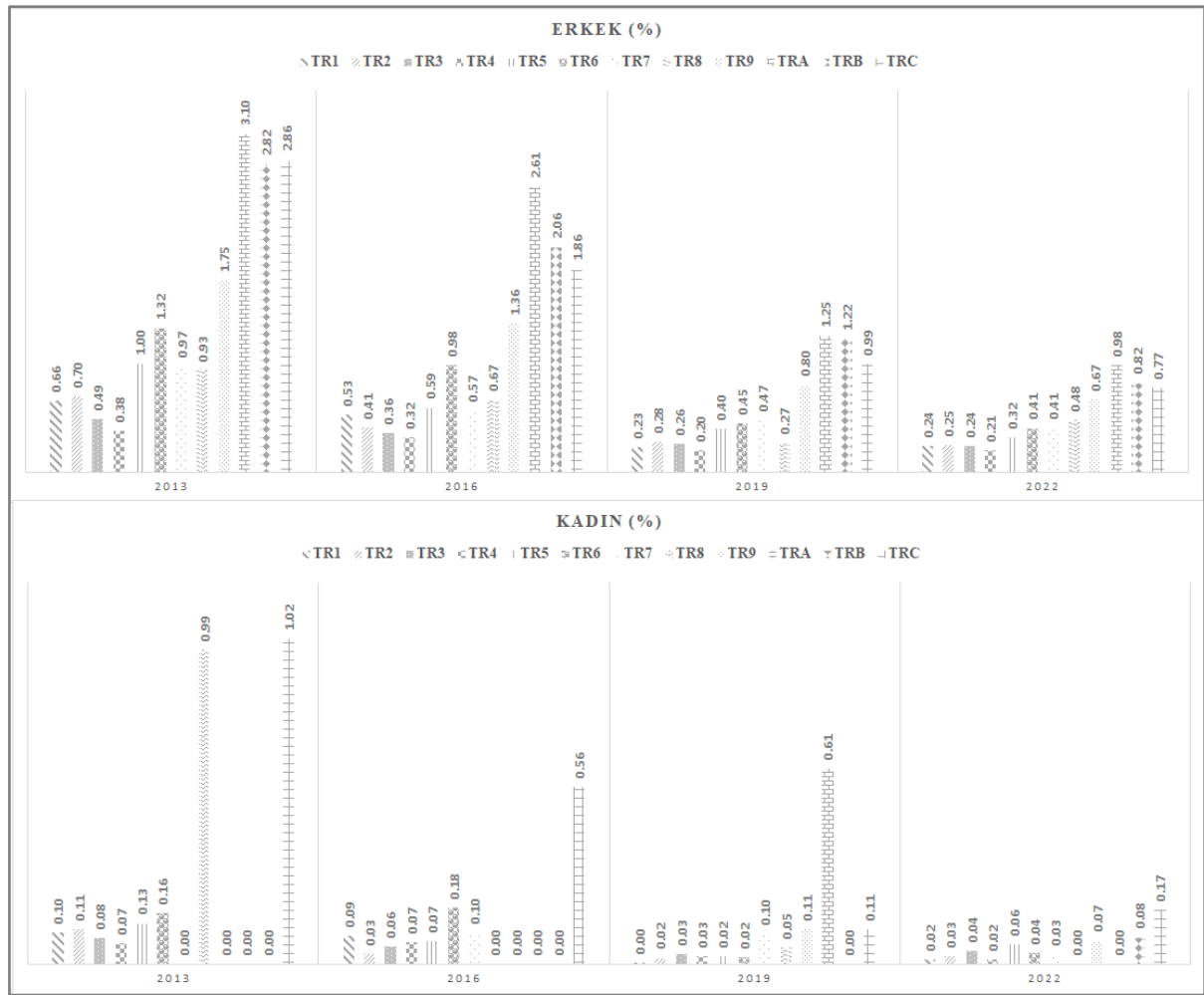
sektöründe iş kazası geçiren birinin kaza sonucunda ölme olasılığı %3,1 iken bu olasılık 2022 yılında %4,2’ye yükselmiştir.



Şekil 3. Sektörlerde ölümle sonuçlanan iş kazası olasılıkları (%). (A) Tarım, ormancılık ve balıkçılık, (B) Madencilik ve taş ocakçılığı, (C) İmalat, (D) Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, (E) Su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri, (F) İnşaat, (G) Ulaştırma-depolama, (H) Konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri, (I) İnsan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri.

Bölgelerde ölümle sonuçlanan iş kazası olasılıkları (%) Şekil 4’te özetlenmiştir. Erkeklerde en yüksek ölümlü iş kazası geçirme olasılığı TRA (Kuzeydoğu Anadolu) bölgesinde gözlemlenmiştir. 2013-2022 yıllarında TRA bölgesinde meydana gelen iş kazalarının sırasıyla %3,1, %2,61, %1,25 ve %0,98’i ölümlü olarak gerçekleşmiştir. TRA bölgesini TRB (Ortadoğu Anadolu) ve TRC (Güneydoğu Anadolu) bölgeleri takip etmiştir. Erkeklerde en düşük ölümlü iş kazası geçirme olasılığı TR4 (Doğu Marmara) bölgesinde

gözlemlenmiştir. 2013-2022 yıllarında TR4 bölgesinde meydana gelen iş kazalarının sırasıyla %3,8, %3,2, %2 ve %2,1’i ölümlü olarak gerçekleşmiştir. Kadınlarda 2013, 2016 ve 2022 yıllarında en yüksek ölümlü iş kazası geçirme olasılığı TRC bölgesinde gözlemlenmiştir. 2013, 2016 ve 2022 yıllarında TRC bölgesinde meydana gelen iş kazalarının sırasıyla %1,02, %5,6 ve %1,7 ölümlü olarak gerçekleşmiştir. 2019 yılında ise en yüksek ölümlü iş kazası oranı TRA bölgesinde gözlemlenmiş olup, bu oran %6,1 olmuştur.



Şekil 4. Bölgelerde ölümlle sonuçlanan iş kazası olasılıkları (%). TR1: İstanbul; TR2: Batı Marmara, TR3: Ege, TR4: Doğu Marmara; TR5: Batı Anadolu; TR6: Akdeniz; TR7: Orta Anadolu; TR8: Batı Karadeniz; TR9: Doğu Karadeniz; TRA: Kuzeydoğu Anadolu; TRB: Ortadoğu Anadolu; TRC: Güneydoğu Anadolu.

III. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Logaritmik Doğrusal Modeller

İki ya da daha fazla kategorik değişken arasındaki ilişkileri ve etkileşimleri incelemek amacıyla logaritmik doğrusal (log-doğrusal) modellerden yararlanılabilir. Log-doğrusal modeller beklenen sıklıkların logaritmalarının bağımlı değişken olarak alındığı modellerdir [11,12].

3.1.1. Model yapısı

Kategorik üç değişkenin X, Y ve Z olarak adlandırıldığı bir çalışma düşünelim. Bu çalışmada X değişkeni R, Y değişkeni C ve Z değişkeni K düzeye sahip olsun. Bu durumda elde edilen tablo $R \times C \times K$ boyutlu bir tablodur. X'in i ., Y'nin j . ve Z'nin k . düzeyinin gözlenen sıklığı n_{ijk} ile gösterilir ($i = 1, 2, \dots, R; j = 1, 2, \dots, C; k = 1, 2, \dots, K$).

X, Y ve Z değişkenlerin tamamının birbirleriyle olan ilişkilerini inceleyen log-doğrusal modele doygun model adı verilir. Doygun model denklemi:

$$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{12(ij)} + u_{13(ik)} + u_{23(jk)} + u_{123(ijk)}. \quad (1)$$

Burada $i = 1, 2, \dots, R$, $j = 1, 2, \dots, C$ ve $k = 1, 2, \dots, K$ 'dir. E_{ijk} , X'in i ., Y'nin j . ve Z'nin k . düzeyinin beklenen sıklığıdır. Model denkleminde yer alan u genel etkiyi gösterir. X değişkeninin i . düzeyinin etkisi $u_{1(i)}$, Y değişkeninin j . düzeyinin etkisi $u_{2(j)}$ ve Z değişkeninin k . düzeyinin etkisi $u_{3(k)}$ ile gösterilir ve bu etkiler “ana etkiler” olarak adlandırılır. X değişkeninin i . ve Y değişkeninin j . düzeyinin beraber etkisi $u_{12(ij)}$ ile gösterilir ve bu etki “üçlü etkileşim” olarak adlandırılır [13]. Doygun modelin serbestlik derecesi “0”dır [12]. Bu nedenle analizlerde kullanılmaz. Doygun modelin yedi tane alt modeli bulunmaktadır. Bu modellerin yapıları, özet gösterimleri, model denklemleri ve serbestlik dereceleri Tablo 5’te özetlenmiştir.

Tablo 5. M0-M7 modellerinin özet gösterimleri, model denklemleri ve serbestlik dereceleri

Model	Özet Gösterim*	Model	Serbestlik Derecesi
M0:	[X][Y][Z]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)}$	$RCK - R - C - K + 2$
M1:	[X][YZ]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{23(jk)}$	$RCK - R - CK + 1$
M2:	[Y][XZ]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{13(ik)}$	$RCK - C - RK + 1$
M3:	[Z][XY]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{12(ij)}$	$RCK - K - RC + 1$
M4:	[XY][YZ]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{13(ik)} + u_{23(jk)}$	$K(R - 1)(C - 1)$
M5:	[X][Y][Z]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{12(ij)} + u_{23(jk)}$	$C(R - 1)(K - 1)$
M6:	[X][Y][Z]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{12(ij)} + u_{13(ik)}$	$R(C - 1)(K - 1)$
M7:	[X][Y][Z]	$\log(E_{ijk}) = u + u_{1(i)} + u_{2(j)} + u_{3(k)} + u_{12(ij)} + u_{13(ik)} + u_{23(jk)}$	$(R - 1)(C - 1)(K - 1)$

* Aynı köşeli parantez içinde bulunan değişkenler birbiri ile ilişkili, farklı parantezlerdeki değişkenler birbirinden bağımsızdır.

M0 modeli bağımsızlık modelidir. X, Y ve Z değişkenlerinin bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır. M1-M3 modelleri kısmi bağımsızlık modelleri olarak adlandırılır. Örneğin M1 modeli Y ve Z değişkenlerinin ilişkili olduğu fakat X’in bu değişkenlerden bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır. M4-M6 modelleri koşullu bağımsızlık modelleri olarak adlandırılır. Örneğin M4 modeli X ve Z’nin, Y ve Z’nin ilişkili olduğu fakat X ve Y’nin bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır. M7 modeli ise karşılıklı bağımsızlık modelidir. Tüm değişken çiftlerinin birbiri ile ilişkili olduğu varsayımına dayanmaktadır.

3.1.2. Modele uyumun incelenmesi

M0-M7 modellerine uyumu araştırmak amacıyla aşağıdaki hipotez test edilir:

H_0 : Modele uyum vardır.

H_s : Modele uyum yoktur.

Modellere uyumu araştırabilmek amacıyla olabilirlik oran test istatistiğinden (G^2) yararlanılır. Olabilirlik oran test istatistiğinin genel formülü:

$$G^2 = 2 \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \sum_{k=1}^K n_{ijk} \ln \left(\frac{n_{ijk}}{E_{ijk}} \right)^2 \quad (2)$$

Burada E_{ijk} her modele göre değişiklik gösterir. $G^2 \geq \chi^2_{(\alpha;sd)}$ ise yokluk hipotez reddedilir, % α anlamlılık düzeyinde modele uyum olmadığı söylenir. sd , Tablo 5’te yer alan ve her modele göre değişen serbestlik derecesidir.

3.1.3. En uygun modelin bulunması

Bazı çalışmalarda birden fazla modele uyum bulunabilir. Bu durumda veri yapısına en uygun modele karar vermek gerekir. En uygun modele karar vermek için bilgi kriterlerinden ya da hiyerarşik model yapısından faydalanılabilir.

En yaygın kullanılan kriterler Akaike (AIC) ve Bayesçi (BIC) bilgi kriterleridir [15,16]. Uyum bulunan tüm

modeller için AIC ve BIC kriterleri hesaplanır. En küçük bilgi kriterine sahip model en uygun modeldir.

$$AIC = G^2 - 2sd \quad (3)$$

$$BIC = G^2 - sd \ln(n) \quad (4)$$

Hiyerarşik logaritmik doğrusal modeller, veri yapısına en uygun modeli bulabilmek için başlangıç noktası olarak Eşitlik (1)’de yer alan doygun modelden alınarak geriye doğru karşılıklı bağımsızlık, koşullu bağımsızlık, kısmi bağımsızlık ve tam bağımsızlık modellerinin uygulandığı bir süreçtir.

3.1.4. Odds oranı

Odds oranı (θ), bağımlı ve bağımsız ayrımı yapılabilen iki kategorik değişken arasındaki ilişkinin bir ölçüsüdür. Odds oranı genel olarak, bağımsız değişkenin varlığında bağımlı değişkenin ortaya çıkması olasılığının, bağımsız değişkenin yokluğunda bağımlı değişkenin ortaya çıkması olasılığı ile karşılaştırılmasıdır [17]. 2x2 bir tablo için odds oranı:

$$\theta = \frac{n_{11}n_{22}}{n_{12}n_{21}} \quad (5)$$

RxC boyutlu tablolarda odds oranı tüm alt 2x2 tablolarda uygulanabilir. Bu odds oranına yerel odds oranı adı verilir. (R-1)(C-1) tane yerel odds oranı hesaplanabilir [13].

Uyum bulunan ya da en uygun olduğuna karar verilen model için yerel odds oranı beklenen sıklıklar yardımı ile hesaplanarak değişkenler arasındaki ilişkiler yorumlanabilir. (i, j) gözesi dikkate alındığında yerel odds oranının tahmin değeri:

$$\hat{\theta}_{ij} = \frac{E_{ij}E_{i+1,j+1}}{E_{i,j+1}E_{i+1,j}} \quad (6)$$

$\hat{\theta}_{ij} = 1$ ise iki değişken bağımsızdır. $\hat{\theta}_{ij} < 1$ ise bağımsız değişkenin varlığı bağımlı değişken için bir

risk faktörü değildir. $\hat{\theta}_{ij} > 1$ ise bağımsız değişkenin varlığı bağımlı değişken için bir risk faktörüdür. Odds oranının $\%(1 - \alpha)$ güven aralığı Eşitlik (7)’de özetlenmiştir. Eşitlikte yer alan $\sigma_{(\ln \hat{\theta}_{ij})}$ ise log-odds oranının asimptotik standart hatasıdır [18].

$$\exp\{\ln \hat{\theta}_{ij} \pm Z_{\alpha/2} \times \sigma_{(\ln \hat{\theta}_{ij})}\}, \quad (7)$$

$$\sigma_{(\ln \hat{\theta}_{ij})} = \sqrt{\frac{1}{E_{ij}} + \frac{1}{E_{i+1,j+1}} + \frac{1}{E_{i,j+1}} + \frac{1}{E_{i+1,j}}}.$$

Hesaplanan güven aralığı “1” değerini içermiyorsa odds oranı anlamlıdır.

3.2. Model Sonuçları

Cinsiyet ve kaza sonucu temel alınarak yaş, sektör, bölge ve mevsim dikkate alınarak oluşturulan çapraz tablolar ve boyutları aşağıdaki gibidir:

- ❖ Yaş x Cinsiyet x Kaza Sonucu (6 x 2 x 2)

- ❖ Sektör x Cinsiyet x Kaza Sonucu (9 x 2 x 2)
- ❖ Bölge x Cinsiyet x Kaza Sonucu (12 x 2 x 2)
- ❖ Mevsim x Cinsiyet x Kaza Sonucu (4 x 2 x 2)

Oluşturulan bu dört çapraz tablonun her biri için tüm yıllarda hiyerarşik logaritmik doğrusal model uygulanmış ve en uygun model belirlenmiştir. Modellere göre elde edilen sonuçlar Tablo 6’da özetlenmiştir.

Yaş değişkeninin dikkate alındığı tablo yapısında tüm yıllarda Yaş x Cinsiyet, Yaş x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı logaritmik doğrusal model en uygun model olarak elde edilmiştir (p=0,285; p=0,058; p=0,741; p=0,252; Tablo 6). Sektör değişkeninin dikkate alındığı tablo yapısında tüm yıllarda Sektör x Cinsiyet, Sektör x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı logaritmik doğrusal model en uygun model olarak elde edilmiştir (p=0,649; p=0,427; p=0,225; p=0,189; Tablo 6).

Tablo 6. Yıllara göre elde edilen logaritmik doğrusal model sonuçları

Değişken	Yıllar	En Uygun Model	Kod	G ²	sd	p
Yaş	2013	$\log E_{ijk} = u + u_i^Y + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{YC} + u_{ik}^{YK} + u_{jk}^{CK}$	M7	6,223	5	0,285
	2016	$\log E_{ijk} = u + u_i^Y + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{YC} + u_{ik}^{YK} + u_{jk}^{CK}$	M7	10,670	5	0,058
	2019	$\log E_{ijk} = u + u_i^Y + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{YC} + u_{ik}^{YK} + u_{jk}^{CK}$	M7	2,735	5	0,741
	2022	$\log E_{ijk} = u + u_i^Y + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{YC} + u_{ik}^{YK} + u_{jk}^{CK}$	M7	6,601	5	0,252
Sektör	2013	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	5,982	8	0,649
	2016	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	8,072	8	0,427
	2019	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	10,602	8	0,225
	2022	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	11,233	8	0,189
Bölge	2013	$\log E_{ijk} = u + u_i^B + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{BC} + u_{ik}^{BK} + u_{jk}^{CK}$	M7	11,474	11	0,404
	2016	$\log E_{ijk} = u + u_i^B + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{BC} + u_{ik}^{BK} + u_{jk}^{CK}$	M7	11,434	11	0,408
	2019	$\log E_{ijk} = u + u_i^B + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{BC} + u_{ik}^{BK} + u_{jk}^{CK}$	M7	9,047	11	0,618
	2022	$\log E_{ijk} = u + u_i^B + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{BC} + u_{ik}^{BK} + u_{jk}^{CK}$	M7	10,161	11	0,516
Mevsim	2013	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	4,164	3	0,244
	2016	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M7	1,280	3	0,734
	2019	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M5	7,440	6	0,282
	2022	$\log E_{ijk} = u + u_i^M + u_j^C + u_k^K + u_{ij}^{MC} + u_{ik}^{MK} + u_{jk}^{CK}$	M5	2,396	6	0,880

Bölge değişkeninin dikkate alındığı tablo yapısında tüm yıllarda Bölge x Cinsiyet, Bölge x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı logaritmik doğrusal model en uygun model olarak elde edilmiştir (p=0,404; p=0,408; p=0,618; p=0,516; Tablo 6).

Mevsim değişkeninin dikkate alındığı tablo yapısında 2013 ve 2016 yıllarında Mevsim x Cinsiyet, Mevsim x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı model (p=0,244; p=0,734), 2019 ve 2022 yıllarında ise Mevsim x Cinsiyet ve Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı model en uygun

model olarak elde edilmiştir (p=0,282; p=0,880; p=0,618; p=0,516; Tablo 6). 2019 ve 2022 yıllarında Mevsim x Kaza Sonucu etkileşimi anlamlı bulunmamıştır (p=0,250; p=0,912).

3.2.1. Yaş gruplarına göre model sonuçları

Yaş x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için M7 modelleri altında elde edilen beklenen sıklıklar Tablo 7’de özetlenmiştir. Tablo 7’de yer alan beklenen sıklıklardan yararlanılarak hesaplanan odds oranları Tablo 8’de özetlenmiştir.

Tablo 7. Yaş x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için model altında elde edilen beklenen sıklıklar

Yaş	Cinsiyet	Beklenen Sıklıklar (E _{ij})							
		2013		2016		2019		2022	
		Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.
14 – 19	Erkek	65,1	9907,2	42,7	15163,1	27,4	22687,7	45,8	35913,0
	Kadın	1,9	1770,8	2,2	5161,0	0,6	6594,3	1,2	9127,0
20 – 29	Erkek	293,0	63496,1	268,8	83104,8	183,3	114289,8	246,8	170221,0
	Kadın	6,0	8083,9	7,2	14498,1	3,7	30073,3	7,2	46931,0
30 – 39	Erkek	377,9	59084,1	338,9	80535,8	237,0	106446,0	285,2	123602,4
	Kadın	7,1	6942,9	9,1	14038,2	4,0	23396,0	6,8	28168,4
40 – 49	Erkek	364,5	31064,4	362,8	46528,1	344,1	69256,4	416,1	94871,4
	Kadın	6,5	3448,6	11,2	9335,9	7,9	20424,6	13,8	29959,7
50 – 59	Erkek	189,8	6462,9	281,4	14033,9	253,8	21813,3	357,2	35950,1
	Kadın	2,2	474,1	5,7	1834,1	4,2	4616,7	8,8	8406,9
60+	Erkek	45,7	629,2	74,5	1749,3	80,4	2614,9	126,8	5211,0
	Kadın	0,3	24,8	0,6	85,7	0,6	250,1	1,2	461,0

Yara: yaralanmalı iş kazası, ölüm: ölümlü iş kazası

Tablo 8. Yaş sınıflandırmasına göre hesaplanan odds oranları

Yaş	Odds Oranı			
	2013	2016	2019	2022
14 – 19 ; 20 – 29	1,425	1,147*	1,330*	1,140*
14 – 19 ; 30 – 39	1,028	1,493*	1,840*	1,810*
14 – 19 ; 40 – 49	1,785*	2,766*	4,120*	3,440*
14 – 19 ; 50 – 59	4,467*	7,112*	9,640*	7,800*
14 – 19 ; 60+	11,052*	15,098*	25,480*	19,100*
20 – 29 ; 30 – 39	1,386*	1,301*	1,390*	1,590*
20 – 29 ; 40 – 49	2,543*	2,411*	3,099*	3,020*
20 – 29 ; 50 – 59	6,363*	6,199*	7,257*	6,850*
20 – 29 ; 60+	15,744*	13,160*	19,179*	16,790*
30 – 39 ; 40 – 49	1,835*	1,853*	2,230*	1,900*
30 – 39 ; 50 – 59	4,591*	4,764*	5,230*	4,310*
30 – 39 ; 60+	11,360*	10,115*	13,810*	10,550*
40 – 49 ; 50 – 59	2,502*	2,571*	2,340*	2,270*
40 – 49 ; 60+	6,192*	5,459*	6,190*	5,550*
50 – 59 ; 60+	2,474*	2,123*	2,643*	2,450*

*: (1/odds oranı) değeri verilmiştir. %5 anlamlılık düzeyinde önemli bulunan odds oranları koyu renk ile yazılmıştır.

2013 yılında 14-19 yaş aralığında olan birinin 20-29 yaş aralığındaki birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 1,425 kat daha fazladır. 2016 ve sonraki yıllarda 14-19 yaş aralığındakiler ile 20-29 yaş aralığındakilerin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski benzerdir ($p=0,427$; $p=0,149$; $p=0,437$).

2013 yılında 14-19 yaş aralığındakiler ile 30-39 yaş aralığındakilerin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski benzerdir ($p=0,852$). 2016, 2019 ve 2022 yıllarında ise 30-39 yaş aralığında olan birinin ile 14-19 yaş aralığındaki birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski sırasıyla 1,493, 1,840 ve 1,810 kat daha fazladır. Genel olarak iş kazası geçiren 19 yaş üstü kişilerde ölüm riski, 14-19 yaş aralığındakilere göre 2013-2019 yılları arasında artış göstermiş, 2022 yılında ise 2019’a göre azalmıştır. 19 yaş üstü kişilerde ölüm riski, 14-19 yaş aralığındakilere göre 2013-2019 yılları arasında artış göstermiş, 2022 yılında ise 2019’a göre azalmıştır.

Diğer beş yaş grubunda (19 yaş üstü) geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riskleri birbirinden farklıdır. 2013 yılında 60 yaş ve üzeri olan birinin 20-29 ve 30-39 yaş aralığındaki birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski sırasıyla 15,744 ve 11,360 kat daha fazladır.

3.2.2. Sektörlere göre model sonuçları

Sektörlere x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için M7 modelleri altında elde edilen beklenen sıklıklar Tablo 9’da özetlenmiştir. Tablo 9’da yer alan beklenen sıklıklardan yararlanılarak hesaplanan odds oranları Tablo 10’da özetlenmiştir.

İnşaat sektöründe çalışan biri ile tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013, 2016 ve 2019 yıllarında benzerdir ($p=0,419$; $p=0,607$, $p=0,070$). 2022 yılında ise tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan birinin iş kazasının ölümle sonuçlanması riski inşaattan yaklaşık 1,5 kat daha

fazladır. İnşaat sektöründe çalışan birinin ile madencilik ve taş ocaklığı sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 3,179 kat, 2016 yılında 1,583 kat, 2019 yılında ise 2,285 kat daha fazladır. 2022 yılında ise bu iki sektörün riski benzerdir ($p=0,070$). İnşaat sektöründe çalışan birinin imalatta çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 6,079 kat, 2022 yılında 4,605 kat daha fazladır.

2013, 2016 ve 2019 yıllarında elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı risk bakımından inşaat sektörü ile benzerken ($p=0,197$; $p=0,322$; $p=0,098$), 2022 yılında inşaat sektöründe geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 1,559 kat daha fazladır. 2013 yılında inşaat sektöründe çalışan birinin ulaştırma-depolama sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 1,263 kat daha fazla iken, sonraki yıllarda bu iki sektörün riskleri benzerdir ($p=0,060$; $p=0,315$; $p=0,101$).

Tablo 9. Sektör x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için model altında elde edilen beklenen sıklıklar

Sektör	Cinsiyet	Beklenen Sıklıklar (E_{ij})							
		2013		2016		2019		2022	
		Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.
A	Erkek	21,9	1354,4	23,6	1916,4	29,6	2727,3	34,3	3420,7
	Kadın	1,0	317,6	2,1	873,7	1,3	913,7	1,5	1189,4
B	Erkek	87,1	14261,6	83,1	11710,6	48,1	14080,6	105,2	19206,3
	Kadın	0,1	42,0	0,1	80,9	0,0	86,0	0,1	162,0
C	Erkek	277,2	86828,1	253,4	113539,6	199,6	153202,8	321,0	222003,7
	Kadın	6,5	10199,3	8,1	18356,9	5,1	29419,8	8,6	46615,4
D	Erkek	10,0	778,0	15,0	1730,0	21,0	3899,9	25,0	5853,8
	Kadın	0,0	17,0	0,1	30,0	0,0	54,0	0,1	135,0
E	Erkek	11,9	1103,1	22,9	4926,9	21,9	6931,9	26,9	7452,8
	Kadın	0,1	62,9	0,1	124,9	0,1	206,0	0,1	324,9
F	Erkek	521,3	26861,5	496,5	44203,8	368,2	47209,9	422,7	63476,7
	Kadın	0,4	104,7	0,8	346,4	0,5	489,7	0,6	704,8
G	Erkek	225,0	14638,4	218,6	16709,1	211,4	24811,3	254,0	33449,7
	Kadın	4,8	1573,6	6,2	2377,9	4,5	3921,6	5,8	6040,0
H	Erkek	15,7	7713,6	31,0	12455,0	29,6	28247,6	45,2	35343,9
	Kadın	1,2	2904,1	2,8	5569,1	2,1	15179,7	3,4	20720,3
I	Erkek	6,0	474,3	6,9	1576,7	4,6	4675,7	16,6	9859,5
	Kadın	1,8	735,9	2,7	3120,1	1,3	9748,6	3,8	17521,2

Sektör kısaltmaları: (A) Tarım, ormancılık ve balıkçılık, (B) Madencilik ve taş ocaklığı, (C) İmalat, (D) Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, (E) Su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri, (F) İnşaat, (G) Ulaştırma-depolama, (H) Konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri, (I) İnsan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri. Yara: yaralanmalı iş kazası, ölüm: ölümlü iş kazası.

Tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan birinin, madencilik ve taş ocaklığı sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 2,648 kat, 2019 yılında 3,175 kat daha fazladır. Tarım, ormancılık ve balıkçılık, sektöründe çalışan birinin, imalat sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 ve 2016 yıllarında yaklaşık 5 kat, 2019 yılında 8,318 kat ve 2022 yılında 6,941 kat daha fazladır. Tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan biri ile elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 ve 2016 yıllarında benzerdir ($p=0,541$; $p=0,263$). 2019 ve 2022 yıllarında ise tarım, ormancılık ve balıkçılık, sektöründe çalışan birinin iş kazasının ölümle sonuçlanması riski diğerinden yaklaşık 2 kat daha fazladır. Tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan biri ile ulaştırma-depolama sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tüm yıllarda benzerdir ($p=0,805$; $p=0,834$, $p=0,188$, $p=0,141$).

2022 yılı dikkate alındığında, genel olarak, ulaştırma-depolama sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tarım, ormancılık ve balıkçılık ile inşaat sektörleri dışındaki tüm sektörlerden daha yüksektir. Ulaştırma-depolama sektöründe çalışan birinin madencilik ve taş ocaklığı sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 2,517 kat daha fazla iken, 2022 yılında 1,386 kat daha fazladır. Ulaştırma-depolama sektöründe çalışan birinin imalat sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2022 yılında yaklaşık 5 kat daha fazladır.

Madencilik ve taş ocaklığı sektöründe çalışan biri ile su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tüm yıllarda benzerdir ($p=0,058$; $p=0,075$, $p=0,782$, $p=0,055$). Madencilik ve taş ocaklığı sektöründe çalışan birinin imalat sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 1,912

kat daha fazla iken bu risk 2019 yılında 3,789 kata çıkmıştır. 2022 yılı dikkate alındığında, genel olarak, madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe çalışan birisi iş kazası geçirdiğinde imalat, konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri ve insan sağlığı ve sosyal hizmet

faaliyetlerinden daha yüksek ölüm riskine sahiptir denebilir. Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri ve inşaat ile benzer riske sahiptir ($p=0,267$; $p=0,055$; $p=0,070$).

Tablo 10. Sektörlere göre hesaplanan odds oranları

Sektör	Odds Oranı				Sektör	Odds Oranı			
	2013	2016	2019	2022		2013	2016	2019	2022
(A) – (B)	2,648	1,737	3,175	1,832	(C) – (G)	4,814*	5,860*	6,539*	5,252*
(A) – (C)	5,064	5,523	8,318	6,941	(C) – (H)	1,567	1,113*	1,242	1,131
(A) – (D)	1,262	1,423	2,012	2,351	(C) – (I)	3,939*	1,966*	1,335	1,168*
(A) – (E)	1,503	2,649	3,423	2,779	(D) – (E)	1,191	1,861	1,701	1,182
(A) – (F)	1,200*	1,098	1,389	1,507	(D) – (F)	1,515*	1,297*	1,448*	1,559*
(A) – (G)	1,052	1,061*	1,272	1,322	(D) – (G)	1,200*	1,510*	1,582*	1,778*
(A) – (H)	7,935	4,961	10,328	7,849	(D) – (H)	6,288	3,485	5,132	3,339
(A) – (I)	1,019	1,974	5,520	2,529	(D) – (I)	1,019	1,974	5,520	2,529
(B) – (C)	1,912	3,179	2,620	3,789	(E) – (F)	1,804*	2,413*	2,463*	1,844*
(B) – (D)	2,098*	1,220*	1,578*	1,283	(E) – (G)	1,429*	2,810*	2,691*	2,103*
(B) – (E)	1,762*	1,525	1,078	1,517	(E) – (H)	5,281	1,873	3,018	2,824
(B) – (F)	3,179*	1,583*	2,285*	1,216*	(E) – (I)	1,169*	1,061	3,246	2,139
(B) – (G)	2,517*	1,843*	2,496*	1,386*	(F) – (G)	1,263	1,165*	1,092*	1,140*
(B) – (H)	2,997	2,856	3,253	4,284	(F) – (H)	9,526	4,520	7,433	5,207
(B) – (I)	2,060*	1,618	3,499	3,245	(F) – (I)	1,543	2,560	7,995	3,945
(C) – (D)	4,012*	3,880*	4,133*	2,953*	(G) – (H)	7,544	5,264	8,119	5,938
(C) – (E)	3,370*	2,085*	2,430*	2,497*	(G) – (I)	1,222	2,982	8,732	4,498
(C) – (F)	6,079*	5,032*	5,987*	4,605*	(H) – (I)	6,172*	1,765*	1,075	1,320*

Sektör kısaltmaları: (A) Tarım, ormancılık ve balıkçılık, (B) Madencilik ve taş ocakçılığı, (C) İmalat, (D) Elektrik, gaz, buhar ve iklimlendirme üretimi ve dağıtımı, (E) Su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri, (F) İnşaat, (G) Ulaştırma-depolama, (H) Konaklama ve yiyecek hizmeti faaliyetleri, (I) İnsan sağlığı ve sosyal hizmet faaliyetleri. *: (1/odds oranı) değeri verilmiştir. %5 anlamlılık düzeyinde önemli bulunan odds oranları koyu renk ile yazılmıştır.

3.2.3. Bölgelere göre model sonuçları

Bölge x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için M7 modelleri altında elde edilen beklenen sıklıklar Tablo 11’de özetlenmiştir. Tablo 11’de yer alan beklenen sıklıklardan yararlanılarak hesaplanan odds oranları Tablo 12’de özetlenmiştir.

Genel olarak tüm bölgelerde erkeklerde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski kadınlara göre 2013 yılında 6 kat, 2016 yılında 6,5 kat, 2019 yılında 12,4 kat, 2022 yılında 9,23 kat daha fazladır.

Tüm yıllarda TR1 (İstanbul) ve TR2 (Batı Marmara) bölgelerinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski benzerdir ($p=0,672$; $p=0,062$; $p=0,192$; $p=0,663$). TR1 bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski 2013 ve 2016 yıllarında TR3 (Ege) bölgesine göre daha yüksek iken 2019 yılı ve sonrasında azalarak bu yıllar ile benzer olmuştur ($p=0,161$; $p=0,653$).

Gerçekleşen bir iş kazasının ölümle sonuçlanması riski en düşük TR4 (Doğu Marmara) bölgesindedir.

TR1 bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski 2013 ve 2016 yıllarında TR4 bölgelerine göre 1,743 ve 1,643 kat daha fazladır. 2019 yılı ve sonrasında ise benzerdir ($p=0,373$; $p=0,140$).

TR2 bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski 2013 yılında TR4 bölgelerine göre 1,855 kat daha fazla iken 2016 yılı ve sonrasında benzerdir ($p=0,167$; $p=0,067$; $p=0,153$). Tüm yıllarda TR5 (Batı Anadolu) ve TR7 (Orta Anadolu) bölgelerinde iş kazasının ölümle sonuçlanma riskleri benzerdir ($p=0,824$; $p=0,831$; $p=0,204$; $p=0,113$).

Tüm yıllarda TRA (Kuzeydoğu Anadolu), TRB (Ortadoğu Anadolu) ve TRC (Güneydoğu Anadolu) bölgelerinde iş kazasının ölümle sonuçlanma riskleri benzerdir ($p=0,697$; $p=0,268$; $p=0,731$; $p=0,552$; $p=0,723$; $p=0,099$; $p=0,227$; $p=0,355$; $p=0,910$; $p=0,702$; $p=0,297$; $p=0,787$).

Tablo 11. Bölge x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için model altında elde edilen beklenen sıklıklar

Bölge	Cinsiyet	Beklenen Sıklıklar (E _{ij})							
		2013		2016		2019		2022	
		Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.
TR1	Erkek	212,5	32131,0	307,0	57462,9	194,5	85302,3	237,1	99998,4
	Kadın	5,4	4945,1	10,0	12174,1	4,5	24392,8	7,9	30698,8
TR2	Erkek	59,9	8505,7	53,1	13094,2	47,9	17054,4	64,8	25801,6
	Kadın	2,1	1816,4	1,9	3068,8	1,1	4956,6	2,2	7905,5
TR3	Erkek	185,0	37954,9	160,0	43741,2	153,5	57922,1	200,7	81222,1
	Kadın	4,0	4895,1	5,0	8840,9	3,5	16275,9	6,3	23550,0
TR4	Erkek	135,1	35606,7	158,0	48600,2	128,4	61970,3	182,5	89289,8
	Kadın	2,9	4585,3	5,0	9942,9	2,5	15300,7	5,5	24824,3
TR5	Erkek	160,4	16013,4	146,3	24625,5	129,4	32217,8	141,0	42658,0
	Kadın	2,6	1551,6	3,7	4090,4	2,6	8138,2	4,0	11088,0
TR6	Erkek	182,9	13752,4	187,8	18909,2	142,5	32183,7	208,8	51628,8
	Kadın	4,1	1850,6	5,2	3373,8	3,4	9679,3	6,2	14142,2
TR7	Erkek	90,4	9277,4	69,1	12007,5	72,2	14915,1	86,7	21208,5
	Kadın	0,7	401,5	0,9	1010,4	0,8	2101,8	1,3	3013,4
TR8	Erkek	88,5	9133,3	74,6	11280,1	39,6	14260,0	105,5	22117,5
	Kadın	0,5	303,7	1,4	1350,9	0,4	1941,9	1,5	2978,4
TR9	Erkek	36,7	2077,3	40,1	2972,9	43,4	5333,3	40,0	5969,9
	Kadın	0,4	120,7	0,9	456,1	0,6	905,7	1,0	1338,1
TRA	Erkek	29,9	939,1	31,8	1194,1	24,8	1899,9	28,4	2928,5
	Kadın	0,2	28,9	0,2	59,9	0,2	163,0	0,6	587,5
TRB	Erkek	41,8	1445,2	40,3	1945,6	47,4	3891,2	42,9	5199,0
	Kadın	0,2	50,8	0,7	227,4	0,6	592,8	1,1	1178,0
TRC	Erkek	113,1	3807,8	101,0	5281,6	102,3	10157,8	139,5	17747,1
	Kadın	1,0	195,2	1,1	357,4	0,7	906,2	1,5	1749,8

Bölge kısaltmaları: TR1: İstanbul; TR2: Batı Marmara; TR3: Ege; TR4: Doğu Marmara; TR5: Batı Anadolu; TR6: Akdeniz; TR7: Orta Anadolu; TR8: Batı Karadeniz; TR9: Doğu Karadeniz; TRA: Kuzeydoğu Anadolu; TRB: Ortadoğu Anadolu; TRC: Güneydoğu Anadolu. Yara: yaralanmalı iş kazası, ölüm: ölümlü iş kazası.

TR9 bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski 2013 yılında TRA, TRB ve TRC bölgelerine göre daha düşük iken 2019 yılı ve sonrasında bu yıllar ile benzer olmuştur ($p=0,051$; $p=0,149$; $p=0,055$; $p=0,339$; $p=0,229$; $p=0,364$). Diğer bir deyişle bu bölgede geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanmada en riskli olan üç bölgeye yaklaşmıştır.

2022 yılında TR9 (Doğu Karadeniz), TRA, TRB ve TRC bölgelerinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski TR1 bölgesine göre sırasıyla 2,828, 4,088, 3,484 ve 3,316 kat daha fazladır.

TRA bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski TR3 bölgesine göre 2013 yılında 6,522 kat daha fazla iken, 2016 yılında 7,271 kat daha fazladır. 2022 yılında ise 3,923’e düşmüştür. TRA bölgesinde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski TR4 bölgesine göre 2013 yılında 8,379 kat daha fazla iken, 2022 yılında 4,742 kat daha fazladır. Bunun sebebi 2022 yılında TRA bölgesindeki ölümlü iş kazası sayısının azalmasıdır.

3.2.3. Mevsimlere göre model sonuçları

Mevsim x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için 2013 ve 2016 yılları için M7 modeli altında, 2019 ve 2022

yılları için M5 modeli altında elde edilen beklenen sıklıklar Tablo 13’te özetlenmiştir. Tablo 13’te yer alan beklenen sıklıklardan yararlanılarak hesaplanan odds oranları ise Tablo 14’de özetlenmiştir.

2019 ve 2022 yıllarında mevsim ve kaza sonucu etkileşimleri anlamlı bulunmamıştır ($p=0,250$; $p=0,912$).

2013 yılında kış mevsiminde ilkbahar mevsimine göre gerçekleşen iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 1,231 kat daha fazladır. Sonbahar mevsiminde ilkbahar mevsimine göre risk 1,295 kat daha fazladır. Kış mevsiminde yaz ve sonbahar mevsimlerine göre iş kazasının ölümle sonuçlanması riskinin benzerlik gösterdiği söylenebilir ($p=0,356$; $p=0,639$).

2016 yılında kış mevsiminde yaz mevsimine göre gerçekleşen iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 1,351 kat; sonbahar mevsiminde 1,193 kat daha fazladır. İlkbahar mevsiminde yaz mevsimine risk 1,246 daha fazladır.

Tablo 12. Bölgelere göre hesaplanan odds oranları

Bölgeler	Odds Oranı				Bölgeler	Odds Oranı			
	2013	2016	2019	2022		2013	2016	2019	2022
TR1 – TR2	1,064*	1,318	1,231*	1,060*	TR4 – TR8	2,555*	2,035*	1,339*	2,333*
TR1 – TR3	1,357	1,460	1,162*	1,042*	TR4 – TR9	4,650*	4,144*	3,927*	3,281*
TR1 – TR4	1,743	1,643	1,100	1,160	TR4 – TRA	8,379*	8,181*	6,306*	4,742*
TR1 – TR5	1,515*	1,112*	1,761*	1,394*	TR4 – TRB	7,617*	6,368*	5,880*	4,042*
TR1 – TR6	2,011*	1,860*	1,942*	1,706*	TR4 – TRC	7,826*	5,880*	4,858*	3,847*
TR1 – TR7	1,473*	1,078*	2,123*	1,724*	TR5 – TR6	1,328*	1,673*	1,103*	1,223*
TR1 – TR8	1,465*	1,239*	1,217*	2,011*	TR5 – TR7	1,028	1,032	1,205*	1,236*
TR1 – TR9	2,668*	2,522*	3,570*	2,828*	TR5 – TR8	1,033	1,114*	1,447	1,443*
TR1 – TRA	4,806*	4,979*	5,732*	4,088*	TR5 – TR9	1,761*	2,268*	2,027*	2,028*
TR1 – TRB	4,369*	3,875*	5,345*	3,484*	TR5 – TRA	3,173*	4,478*	3,255*	2,932*
TR1 – TRC	4,489*	3,579*	4,416*	3,316*	TR5 – TRB	2,885*	3,486*	3,035*	2,499*
TR2 – TR3	1,444	1,108	1,059	1,017	TR5 – TRC	2,964*	3,219*	2,508*	2,378*
TR2 – TR4	1,855	1,247	1,354	1,230	TR6 – TR7	1,365	1,726	1,093*	1,011*
TR2 – TR5	1,424*	1,465*	1,430*	1,316*	TR6 – TR8	1,372	1,501	1,596	1,179*
TR2 – TR6	1,890*	2,451*	1,578*	1,609*	TR6 – TR9	1,327*	1,356*	1,838*	1,658*
TR2 – TR7	1,384*	1,420*	1,724*	1,626*	TR6 – TRA	2,390*	2,678*	2,951*	2,397*
TR2 – TR8	1,378*	1,632*	1,012	1,898*	TR6 – TRB	2,173*	2,084*	2,752*	2,043*
TR2 – TR9	2,507*	3,324*	2,899*	2,668*	TR6 – TRC	2,233*	1,924*	2,274*	1,944*
TR2 – TRA	4,518*	6,562*	4,656*	3,857*	TR7 – TR8	1,005	1,149*	1,744	1,167*
TR2 – TRB	4,107*	5,107*	4,341*	3,287*	TR7 – TR9	1,811*	2,341*	1,682*	1,641*
TR2 – TRC	4,219*	4,716*	3,587*	3,129*	TR7 – TRA	3,264*	4,621*	2,700*	2,372*
TR3 – TR4	1,285	1,125	1,279	1,209	TR7 – TRB	2,967*	3,597*	2,518*	2,021*
TR3 – TR5	2,055*	1,624*	1,515*	1,338*	TR7 – TRC	3,048*	3,321*	2,080*	1,924*
TR3 – TR6	2,728*	2,715*	1,671*	1,637*	TR8 – TR9	1,820*	2,036*	2,933*	1,406*
TR3 – TR7	1,998*	1,573*	1,826*	1,654*	TR8 – TRA	3,280*	4,020*	4,710*	2,032*
TR3 – TR8	1,989*	1,809*	1,047*	1,930*	TR8 – TRB	2,981*	3,129*	4,392*	1,732*
TR3 – TR9	3,620*	3,683*	3,071*	2,714*	TR8 – TRC	3,063*	2,889*	3,629*	1,649*
TR3 – TRA	6,522*	7,271*	4,931*	3,923*	TR9 – TRA	1,802*	1,974*	1,606*	1,446*
TR3 – TRB	5,929*	5,659*	4,598*	3,343*	TR9 – TRB	1,638*	1,537*	1,497*	1,232*
TR3 – TRC	6,091*	5,226*	3,799*	3,182*	TR9 – TRC	1,683*	1,419	1,237*	1,173*
TR4 – TR5	2,640*	1,827*	1,937*	1,618*	TRA – TRB	1,100	1,285	1,072	1,173
TR4 – TR6	3,505*	3,055*	2,137*	1,979*	TRA – TRC	1,071	1,391	1,298	1,233
TR4 – TR7	2,567*	1,770*	2,335*	2,000*	TRB – TRC	1,027*	1,083	1,210	1,051

Bölge kısaltmaları: TR1: İstanbul; TR2: Batı Marmara; TR3: Ege; TR4: Doğu Marmara; TR5: Batı Anadolu; TR6: Akdeniz; TR7: Orta Anadolu; TR8: Batı Karadeniz; TR9: Doğu Karadeniz; TRA: Kuzeydoğu Anadolu; TRB: Ortadoğu Anadolu; TRC: Güneydoğu Anadolu. *: (1/odds oranı) değeri verilmiştir. %5 anlamlılık düzeyinde önemli bulunan odds oranları koyu renk ile yazılmıştır.

Tablo 13. Mevsim x Cinsiyet x Kaza Sonucu tablosu için model altında elde edilen beklenen sıklıklar

Mevsim	Cinsiyet	Beklenen Sıklıklar (E _{ij})							
		2013		2016		2019		2022	
		Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.	Ölüm	Yara.
Kış	Erkek	317,3	38517,7	263,5	53989,9	253,6	75931,4	327,8	103298,2
	Kadın	5,7	4691,3	7,5	10850,1	4,8	19359,2	8,5	26788,5
İlkbahar	Erkek	289,9	43343,0	329,5	62283,4	269,3	80630,7	351,5	110773,5
	Kadın	5,1	5135,0	8,5	11336,6	4,8	19664,2	8,9	28111,1
Yaz	Erkek	353,7	45491,3	420,5	63763,2	288,1	86260,9	399,7	125961,3
	Kadın	6,3	5479,7	10,5	11267,8	5,6	22657,4	10,8	33965,2
Sonbahar	Erkek	375,1	43292,1	355,5	61078,6	314,9	94285,1	399,0	125736,0
	Kadın	7,0	5439,0	9,5	11498,4	5,8	23674,2	10,8	34189,2

Yara: yaralanmalı iş kazası, ölüm: ölümlü iş kazası.

Tablo 14. Mevsim gruplarına göre hesaplanan odds oranları

Mevsimler	Odds Oranı	
	2013	2016
Kış – İlkbahar	1,231	1,084*
Kış – Yaz	1,059	1,351*
Kış – Sonbahar	1,052*	1,193*
İlkbahar – Yaz	1,162*	1,246*
İlkbahar – Sonbahar	1,295*	1,100*
Yaz – Sonbahar	1,114*	1,133

*: (1/odds oranı) değeri verilmiştir. %5 anlamlılık düzeyinde önemli bulunan odds oranları koyu renk ile yazılmıştır.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

İş kazaları, çalışanların sağlığını ve güvenliğini tehdit ettiğinden tüm çalışma hayatını etkilemektedir. Ülkemizde iş kazalarının önlenmesi için 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ile birlikte birçok tedbir alınmıştır. 2012 yılını izleyen yıllarda da tedbirler geliştirilerek alınmaya devam etmektedir. Bu çalışmada İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu sonrasındaki yıllar karşılaştırılmış ve gerçekleşen iş kazası sonucu ölüm oranlarının 2013 yılından 2022 yılına doğru düştüğü gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada iş kazasını geçiren kişinin yaşı, cinsiyeti ve çalıştığı sektör bilgilerinin yanı sıra iş kazasının olduğu bölge ve kazanın gerçekleştiği mevsimin kaza sonucuna (ölümlü-yaralanmalı) etkisi detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışmada 2013, 2016, 2019 ve 2022 yılları dikkate alınmıştır.

4.1. Sonuç ve Değerlendirmeler

Ceylan [1] çalışmasında 1996 yılından 2009 yılına kadar meydana gelen iş kazası sayıları incelenmiş ve yıllara göre iş kazası sayılarında belirgin bir azalma görülürken, ölüm sayılarında dikkate değer bir azalma olmadığı saptanmıştır. Bu durum, incelenen yıllarda kazaların daha az sıklıkta meydana geldiği ancak kazanın ölümle sonuçlanması riskinin fazla olduğu şeklinde yorumlanabilir. Bu yıllarda iş kazalarını önlemeye yönelik alınan tedbirlerin kaza sayılarında azalmaya yol açtığı, fakat kaza sonucu ölüm riskini azaltılmadığı söylenebilir. Bu çalışmada ise 2013 yılından 2022 yılına kadar iş kazası geçirme oranlarında belirgin bir artış yaşandığı fakat iş kazası sonucunda ölüm riskinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Önceki yılların aksine, 2013 ve sonraki yıllarda iş kazalarının daha sıklıkla meydana geldiği ancak sonucunda ölüm riskinin azaldığı gözlenmiştir.

Farklı yıllarda yaş değişkeni ile kurulan logaritmik doğrusal modellerde, Yaş x Cinsiyet, Yaş x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı model en uygun model olarak belirlenmiştir. 60 yaş ve üzeri olanların geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski diğer yaş gruplarına göre daha fazla olarak bulunmuştur. Diğer bir deyişle, yaş arttıkça iş kazasının ölümle sonuçlanması riskinin artmakta olduğu söylenebilir. Bunun sebebi, yüksek yaşlardaki

çalışan sayısının diğer yaş gruplarına göre daha az olmasıdır. Öztürk ve Akın [10] çalışmasında 2018 yılında meydana gelen iş kazaları yaş bakımından değerlendirilmiş, 60 ve üzeri olan çalışanların iş kazası sonucunda ölüm riskinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma da önceki çalışmaya uyumlu sonuç bulunmuştur. 2018 yılı sonrasında da bu yaş grubundaki riskin fazla olması yaşlı çalışanlara yönelik tedbirlerin yeterli düzeyde olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, yaşlı çalışanlara yönelik alınan iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin artırılması gerekebilir.

Dündar ve arkadaşları [5] çalışmasında, 2021 yılında Türkiye’de meydana gelen iş kazalarının yaralanma ile sonuçlanması bakımından en riskli sektörün kömür ve linyit madenciliği olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada ise, iş kazası geçirenler sektörler bakımından değerlendirildiğinde, genel olarak sektörlerin çoğunda iş kazası geçirme olasılıkları 2013’ten 2022’ye doğru arttığı söylenebilir. 2013 ve sonraki yıllarda iş kazası geçirme oranı en yüksek sektör madencilik ve taş ocaklığı sektörü olarak bulunmuştur. Bunun sebebinin, bu sektörün zorlu çalışma koşulları ve iş sağlığı ve güvenliğini tedbirlerinin yetersizliği olduğu düşünülebilir. Bu durum, çalışanların eğitim seviyesinin yükseltilmesi, iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin eksiksiz biçimde alınması ve denetimlerinin artırılması ile düzeltilebilir. Madencilik ve taş ocaklığı sektörünü, imalat ve su temini (kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri) sektörleri takip etmiştir. Farklı yıllarda sektör değişkeni ile kurulan logaritmik doğrusal modellerde, Sektör x Cinsiyet, Sektör x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı model en uygun model olarak belirlenmiştir. Modeller sonucunda sektörler ile ilgili aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- 2013, 2016 ve 2019 yıllarında inşaat ve tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski istatistiksel olarak benzer iken, 2022 yılında tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışanların riski inşaatın yaklaşık 1,5 kat daha fazladır. Bunun sebebi, tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan sayısının az olması olarak düşünülebilir.

- 2022 yılında tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan birisi iş kazası geçirdiğinde ulaştırma ve depolama dışındaki tüm sektörler göre daha yüksek ölüm riskine sahiptir denebilir.
- Tarım, ormancılık ve balıkçılık sektöründe çalışan biri ile ulaştırma ve depolama sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tüm yıllarda benzerdir.
- İnşaat sektöründe çalışan birinin madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe çalışan birine göre geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski 2013 yılında 3,2 kat daha fazla iken 2022 yılında ise bu iki sektörün riski benzer bulunmuştur. Bunun sebebi 2022 yılında inşaatteki ölümlerin azalmasıdır.
- 2022 yılı dikkate alındığında, genel olarak, inşaat sektöründe çalışan birisi iş kazası geçirdiğinde tarım, ormancılık ve balıkçılıktan daha az; madencilik ve taş ocakçılığı ile ulaştırma ve depolama dışındaki diğer sektörler göre ise daha yüksek ölüm riskine sahip olduğu söylenebilir.
- 2022 yılı dikkate alındığında, genel olarak, ulaştırma ve depolama sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tarım, ormancılık ve balıkçılık ile inşaat sektörleri dışındaki tüm sektörlerden daha yüksektir.
- Madencilik ve taş ocakçılığı sektöründe çalışan biri ile su temini, kanalizasyon, atık yönetimi ve iyileştirme faaliyetleri sektöründe çalışan birinin geçirdiği iş kazasının ölümle sonuçlanması riski tüm yıllarda benzerdir.

Logaritmik doğrusal modeller sonucunda cinsiyet dikkate alındığında, erkeklerde geçirilen iş kazasının ölümle sonuçlanma riski kadınlara göre 2013 yılında 6 kat, 2016 yılında 6,5 kat, 2019 yılında 12,4 kat, 2022 yılında 9,23 kat daha fazladır. Bu durum, yüksek risk içeren sektörlerde (inşaat, madencilik, ulaştırma, vb.) erkek çalışan sayısının kadın çalışan sayısına göre daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, erkek çalışan sayısının daha fazla olduğu bu sektörlerde iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin uygulanmasına daha fazla özen gösterilmelidir.

Farklı yıllarda bölge değişkeni ile kurulan logaritmik doğrusal modellerde, Bölge x Cinsiyet, Bölge x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı model en uygun model olarak belirlenmiştir. 2013 yılında gerçekleşen bir iş kazasının ölümle sonuçlanması riski en düşük Doğu Marmara bölgesindedir. 2022 yılında genel olarak İstanbul, Batı Marmara, Ege ve Doğu Marmara bölgelerinde iş kazası geçiren bir çalışanın ölüm riski kendi aralarında benzer ve diğer bölgelerden daha düşükken; Doğu Karadeniz, Kuzeydoğu Anadolu, Ortadoğu Anadolu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde iş kazası geçiren bir çalışanın ölüm riski kendi aralarında benzer ve diğer bölgelerden daha yüksektir. Bu durum, söz konusu bölgelerde güvensiz çalışma koşulları, denetim eksikliği ve iş sağlığı ve güvenliği kültürünün yetersiz olmasıyla açıklanabilir. Bu bölgelerdeki işverenlerin iş

sağlığı ve güvenliği konusundaki yeterliliğinin ve denetimlerin artırılması; aynı zamanda hem işverenlerin hem de çalışanların iş sağlığı ve güvenliği kültürlerinin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

2013 ve 2016 yıllarında mevsim değişkeni ile kurulan logaritmik doğrusal modellerde, Mevsim x Cinsiyet, Mevsim x Kaza Sonucu, Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı; 2019 ve 2022 yıllarında ise Mevsim x Cinsiyet ve Cinsiyet x Kaza Sonucu etkileşimlerinin yer aldığı modeller en uygun model olarak belirlenmiştir. Genel olarak, 2013 yılında en yüksek ölüm riskine sahip mevsim kış, en düşük ilkbahardır. 2016 yılında ise en yüksek ölüm riskine sahip mevsim yazdır. 2019 ve 2022 yıllarında mevsim ile kaza sonucu arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır. 2019 ve 2022 yıllarında mevsimsel farklılıkların ortadan kalkması, iş sağlığı ve güvenliği tedbirlerinin yıl genelinde daha etkin uygulanmasıyla açıklanabilir.

2022 yılı dikkate alındığında, iş kazası sonucu ölüm riski en yüksek olan sektörler 1) tarım, ormancılık ve balıkçılık, 2) inşaat, 3) ulaştırma ve depolama ve 4) madencilik ve taş ocakçılığı sektörleridir. Bu sektörlerde iş kazası sonucu ölüm riskinin fazla olmasından dolayı iş kazalarının sebepleri detaylı olarak araştırılmalı ve alınması gereken tedbirler değerlendirilmelidir.

Çalışmanın sonucunda genel olarak, iş kazalarının ölümle sonuçlanması olasılıklarının 2013’ten 2022’ye doğru azaldığı fakat bu azalmanın sektörel, bölgesel ve demografik faktörlere bağlı olarak değişiklikler gösterdiği söylenebilir. Çalışmanın sonuçları, alınan tedbirlerin etkinliğini gösterse de iyileştirme çalışmalarının sürdürülebilir olması gerekmektedir.

İş kazalarını önlemek amacıyla, iş sağlığı ve güvenliği mevzuatı çerçevesinde, işverenlerin üzerlerine düşen sorumlulukları tam olarak yerine getirmeleri gerekmektedir. Bunun yanı sıra, devlet işverenler üzerindeki denetim mekanizmalarını daha sıkı hale getirmelidir. Çalışanların ise iş güvenliği tedbirlerine harfiyen uymaları gerekmektedir. Son olarak, iş kazalarının sürekli olarak izlenmesi ve takip edilmesi, gerekli analizler yapılarak güvenlik önlemlerinin devamlı olarak iyileştirilmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Ceylan, H. (2011). Türkiye’deki iş kazalarının genel görünümü ve gelişmiş ülkelerle kıyaslanması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(2), 18-24.
- [2] Güğercin, Ö. & Baytorun, A. N. (2018). Tarımda iş kazaları ve gerekli önlemler. *Çukurova Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, 33(2), 157-168.

- [3] Güney, A. (2009). Türkiye’de iş kazalarının nedenleri ve önlenmesi (Yüksek lisans tezi). Marmara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Türkiye.
- [4] Koç, M. & Akbıyık, N. (2011). Türkiye’de iş kazalarının maliyetleri ve çözüm önerileri. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 2(2), 129-175.
- [5] Dündar, S., Bilim, A., & Bilim, N. (2024). Türkiye’deki yaralanmalı iş kazalarının sektörel dağılımı ve analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 28-33.
- [6] Karakurt, F. Z. & Özbakir, O. (2024). Türkiye’de 2013-2022 yılları arasında yaşanan iş kazalarının kökenleri. *International European Conference on Interdisciplinary Scientific Research-Ix*, 243-263.
- [7] Sosyal Güvenlik Kurumu İstatistik Yıllıkları, <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>, (Erişim 17.03.2024).
- [8] İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin İşyeri Tehlike Sınıfları Tebliği, <https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16909&MevzuatTur=9&MevzuatTertip=5>, (Erişim 15.11.2024).
- [9] Kalkınma Planlamasında İstatistiki Bölge Birimleri Sınıflandırması, <https://ka.gov.tr/sayfalar/kalkinma-planlamasinda-istatistiki-bolge-birimleri-siniflandirmasi--24>, (Erişim 09.05.2023).
- [10] Öztürk, T. & Akın, G. C. (2021). Türkiye’de tüm sektörlerle ait 2018 yılı iş kazalarının ve kaza sonucu yaşam kaybının kazazede yaşı bakımından değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 22, 410-415.
- [11] Aktaş Altunay, S., Yılmaz, A. E., Bahçecitapar, M., & Bakacak Karabenli, L. (2021). SPSS ve R Uygulamalı Kategorik Veri Çözümlemesi, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- [12] Saraçbaşı T. & Aktaş Altunay S., 2016, Kategorik Veri Çözümlemesi, Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.
- [13] Agresti, A. (2002). Categorical Data Analysis (2. baskı). John Wiley & Sons Inc, New York.
- [14] Christensen, R. (1990). Log-linear Models, Springer-Verlag, New York.
- [15] Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716-723.
- [16] Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461-464.
- [17] Szumilas, M. (2010). Explaining odds ratios. *Journal of The Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 19(3), 227-229.
- [18] Morris, J. A. & Gardner, M. J. (1988). Calculating confidence intervals for relative risks (odds ratios) and standardised ratios and rates. *British Medical Journal*, 296, 1313-1316.

Yeni Nesil Akıllı Kişisel Koruyucu Donanımların Sektörel Kullanımına Yönelik Niteliksel Bir İnceleme

A Qualitative Examination of the Sectoral Applications of Next-Generation Smart Personal Protective Equipment

Ahmet ÇABUK ¹, Hızircan KARTAL ², Enes Said KARATAŞ ², Eray ŞEKER ²,
Sıla ÖZKAYA ², Maral ENGİN ², Zeynep Nur SALKIN ², Saadet KARAKUŞ ³, Serap TEPE ⁴

¹Karabük Üniversitesi, Eskipazar Meslek Yüksekokulu, Mülkiyet Koruma ve Güvenlik Bölümü, Karabük, Türkiye

²Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sağlık Yönetimi Bölümü, İstanbul, Türkiye

⁴Sağlık Bilimleri Üniversitesi, Hamidiye Sağlık Bilimleri Fakültesi, Sosyal Hizmet Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Akıllı teknolojilerle donatılan yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar (KKD), çalışanların güvenliği ve iş verimliliğini artırmak için geliştirilen bir çözümdür. Akıllı KKD'ler, ortam koşullarını ve çalışan hareketlerini izleme, potansiyel tehlikeleri önceden tespit etme ve kazaları engelleme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, yüksek maliyetler, eğitim eksiklikleri, yasal düzenlemelerin yetersizliği ve kullanıcı mahremiyeti gibi engeller bu teknolojilerin geniş ölçekli uygulamalarını kısıtlamaktadır. Bu çalışma, KKD'lerin iş güvenliği alanındaki kullanımını incelemektedir. Çalışmada, iş kazalarını önlemek, çalışma ortamını izlemek ve çalışan sağlığını korumak için akıllı sensörler, nesnelerin interneti (IoT), veri analitiği ve yapay zekâ gibi teknolojilerin KKD'lere entegre edilmesi ele alınmaktadır. Çalışma kapsamında, farklı sektörlerdeki iş güvenliği uzmanlarıyla yapılan görüşmeler sonucunda, akıllı KKD'lerin avantajları ve sınırlılıkları tartışılmakta, Türkiye'deki uygulamalara dair sektör temsilcilerinin görüşleri analiz edilmektedir. Katılımcılar, yüksek risk içeren işlerde akıllı KKD'lerin zorunlu hale getirilmesini savunurken, veri gizliliği ve psikolojik baskı gibi sorunlara dikkat çekmiştir. Çalışmada akıllı KKD'lerin iş güvenliği kültürüne katkısı vurgulanırken, maliyet-fayda analizlerinin yapılması ve teknolojinin etkinliğini artıracak yasal düzenlemelerin geliştirilmesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Akıllı kişisel koruyucu donanımlar, iş güvenliği, akıllı teknolojiler, veri gizliliği

Abstract

The next generation of personal protective equipment (PPE) equipped with smart technologies represents an innovative solution designed to enhance worker safety and operational efficiency. Smart PPE possesses the capability to monitor environmental conditions and employee movements, allowing for the proactive identification of potential hazards and the prevention of accidents. However, several barriers, including high costs, deficiencies in training, inadequate regulatory frameworks, and concerns regarding user privacy, limit the widespread adoption of these technologies. This paper examines the application of PPE in the field of occupational safety. It discusses the integration of technologies such as smart sensors, the Internet of Things (IoT), data analytics, and artificial intelligence into PPE to prevent workplace accidents, monitor work environments, and safeguard employee health. Through interviews conducted with occupational safety experts across various sectors, the paper explores the advantages and limitations of smart PPE and analyzes the perspectives of industry representatives regarding its implementation in Turkey. Participants advocate for the mandatory adoption of smart PPE in high-risk occupations while highlighting issues such as data privacy and psychological pressure. The paper emphasizes the contribution of smart PPE to the culture of occupational safety, recommending that cost-benefit analyses be conducted and that legal regulations be developed to enhance the effectiveness of the technology.

Keywords: Smart personal protective equipment, occupational safety, smart technologies, data privacy

1. GİRİŞ

Çalışma şekli ve ortamlarında meydana gelen değişimler [1], küresel iklim değişikliği ve üretim kalitesinin artırma isteği [2], iş yerlerinde güvenliği iyileştirme gerekliliği [3] ve teknolojinin hızlı gelişmesi çalışma hayatı ve iş

sağlığı ve güvenliğinde yeni çözümler geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Özellikle sağlık, inşaat, sanayi, tarım gibi alanlarda çalışanların sağlığı ve güvenliğini sağlamak, korumayı, iş verimini ve üretkenliği artırmak, kişisel koruyucu donanımların performansını geliştirmek için kişisel koruyucu donanımlara akıllı donanımlar eklenmesi, kullanılan malzemelerin geliştirilmesi kritik bir öneme sahiptir. İş yerlerinde çalışanların iş kazası geçirmesi veya meslek hastalığına tutulmasına neden olan tehlike ve tehlikeden kaynaklı risk(ler) bulunmaktadır. İş kazası ve meslek hastalığına neden tehlikelerin, tehlikelerin oluşturduğu riskleri ve ikincil tehlikeleri kaynağında, ortamda ve alıcı üzerinde yok etmek veya sınırlandırmak amacıyla kişilerin katılımıyla sistemli ve bilimsel çalışmalar yürütülmektedir. Tehlike ve risklerin yok edilmesi, sınırlandırılması için risk değerlendirmesi çalışması yapılmaktadır. Bu çalışmada risk değerlendirme ekibi tarafından iş yeri ve iş yerinin sınırdış olduğu alanlarda bulunan canlı ve cansız varlıklara zarar verme potansiyeli olan tehlike belirlenmekte (1), tehlikeden kaynaklı risk ve ikincil tehlikeler tanımlanmakta (2), tehlikenin riske dönüşmesine neden olan olay ve durumlar belirlenmekte (3), belirlenen riskler meydana gelme sıklığı ve vereceği zararlar dikkate alınarak analiz edilmekte (4), analiz sonucunda elde edilen puanlar yüksekte düşüğe doğru sıralanmakta -risk analizi sonucunda puanların aynı olması durumunda ölüme ve ağır yaralanmaya neden olan tehlikelere öncelik verilir- (5), önem derecesine göre tehlike ve risklerin kaynağına önlenmesi ve sınırlandırılması için kontrol önlem ve tedbirlerine karar verilmesi (6), karar verilen önlem ve tedbirlerin uygulanması (7), uygulanan önlem ve tedbirlerin etkinliğinin analiz edilmesi (8), gözden geçirme, çalışmanın raporlanması ve dokümanite edilmesi (9) gerçekleştirilmektedir. Risk değerlendirmesi çalışmasında altıncı (6) basamakta tehlike ve risklerin önlenmesi için belirlenecek önlem ve tedbirlerde öncelik toplu korunmaya yönelik uygulamalara (Kaynağında veya ortamda yok etmek veya sınırlandırmak) yer verilmektedir. Toplu koruma sağlanmadığı durumlarda kişiye yönelik koruma uygulamalara (Alıcıda yok etmek veya sınırlandırmak) yer verilmektedir. Toplu koruma ve kişiye yönelik koruma yöntemlerinin uygulanmasında hiyerarşiye dikkat edilmektedir. Risk yönetim hiyerarşisinde sıralama; tehlikenin kaynağında yok edilmesi (1), tehlikeli maddenin, işlemin tehlikesiz veya daha az tehlikeli olanla değiştirilmesi yani ikame edilmesi (2), mühendislik metot ve yöntemlerinin uygulanması (3), idari önlemler alınması (4), kişisel koruyucu donanım kullanılmasıdır (5). Risk kontrol/ yönetim hiyerarşisinde yer alan ilk dört madde toplu koruma yöntemidir ve tehlike ile riskin kaynağa veya ortamda

yok edilmesi ve sınırlandırılmasına hizmet etmektedir. Son sırada yer alan beşinci madde ise kişiye yönelik koruma yöntemi olup tehlike ve riskin alıcıda önlenmesine hizmet etmektedir. Risk kontrol hiyerarşisinin adımlarının sırasıyla uygulanması hedeflenir ancak tek bir uygulama adımının yetersiz olması durumunda diğer yöntemlerde uygulanır. Kişisel koruyucu donanım kullanımı kişiye yönelik korunma yöntemi olarak son sırada yer almasına rağmen tüm yöntemlerle birlikte kullanılabilir. Kişisel koruyucu donanımların seçiminde kullanılan hammadde, iş sürecine dikkat edilmesi ve çalışanların kendilerine verilen kişisel koruyucu donanımı kurallara ve verilen eğitime -kişisel koruyucu donanımı doğru kullanma ve saklama konusundaki teorik ve pratik eğitime- uygun şekilde kullanması kişisel koruyucu donanımın koruyuculuğuna katkı sağlamaktadır. Kişisel koruyucu donanımların doğru seçilmesi, çalışanların kişisel koruyucuları kurallara uygun olarak kullanması, hem seçimde ve alımda çalışanların işverene güvenmesi hem de çalışanların her zaman ve her durumda kişisel koruyucu donanımı doğru kullanacağını konusunda güvenmesi zararın ve maliyetlerin azalmasına imkân verecektir.

Kimyasal ve fiziksel sensörlerle donatılan, veri analitiği ile gerçek zamanlı izlemeye imkân veren, kullanımının takibinin yapılmasını sağlayan donanımlara sahip kişisel koruyucu donanımlar ortam koşulları hakkında anlık bilgi alınmasında, durumların ve hareketlerin erken tespit edilmesinde önemli potansiyel sunmaktadır [4, 5]. Bu durum iş kazası ve meslek hastalıklarına neden olan tehlikelerin tanımlanmasına, tehlikelerden kaynaklı risklerin belirlenerek önlenmesine veya sınırlandırılmasına imkân vermektedir. Tehlike ve risklerin önlenmesi iş yeri ekosistemini oluşturan tüm canlı ve cansız varlıkların sağlığını ve güvenliğinin korunmasını, geliştirilmesini ve iyileştirilmesini sağlayacak, iş verimini ve üretkenliği artıracaktır.

Bu çalışma, farklı sektörlerde çalışan grupların görüşlerine dayanarak akıllı kişisel koruyucu donanımların (KKD) mevcut durumlarını, avantajlarını, sınırlılıklarını ve benimsenme faaliyetlerini incelemeyi sürdürüyor. Nitel yöntemle yürütülen bu araştırmada, üretim ve hizmet alanında yer alan yapı -inşaat, zemin işleri-, medya, eğitim -üniversite-, eğitim, danışmanlık, telekomünikasyon sektörlerinde yer işletmelerde yönetici olarak görev alan kişilerle görüşmeler yapılmıştır. Yöneticilerle yapılan görüşmelerden elde edilen bulgular, akıllı kişisel koruyucu donanımların kullanımından önemli çıkarımlar sunacaktır. Çalışma, özellikle Türkiye'deki

uygulamalara dikkat çekmekle birlikte, uluslararası literatürle karşılaştırmalar da içermektedir.

II. LİTERATÜR

Uluslararası Çalışma Örgütü tarafından 3 Haziran 1981 tarihinde kabul edilen “155 No’lu İş Sağlığı ve Güvenliği ve Çalışma Ortamına İlişkin Sözleşme hükümleri arasında (Madde 16) “işverenler gerektiğinde, kaza riskinin veya sağlık üzerindeki etkilerinin imkanlar ölçüsünde önlenmesi için uygun koruyucu elbise ve donanım sağlar” bulunmaktadır. İş yerlerinde çalışanların sağlığını ve güvenliğini korunması amacıyla maruz kalınan tehlike (Fiziksel, biyolojik, kimyasal vd.) [1] ve risklere karşı kişisel koruyucu donanım işveren tarafından seçilmekte ve temin edilmektedir. Kişisel koruyucu donanımların temin edilmesi, temizlenmesi, onarılması, saklanması, depolanması, hasar gördüğünde yeniden değiştirilmesi ve çalışanlar tarafından kullanılması işverenin sorumluluğundadır [6]. Çalışan tarafından tutulan, giyilen veya takılarak kullanılan kişisel koruyucu donanımlar (Cihaz, alet ve malzeme) çalışanları bir veya birden fazla tehlike ve riske (mekanik darbeler, kimyasal maddeler, biyolojik ajanlar, zararlı tozlar, radyasyon, termal konfor şartları, gürültü ve titreşime vd.) karşı korumak amacıyla üretilmektedir [7]. Doğru kullanıldığında ölümleri ve yaralanmaların azalmasına imkân veren kişisel koruyucu donanımlar [8] mevzuat ve iş yerinde oluşturulan talimatlara rağmen rahatsız edici, iş yapmayı engelleyici, hantal ve bunaltıcı olduğu düşünüldükçe çalışanlar tarafından düzenli kullanılmamakta, kişisel koruyucu donanım kullanımı için eğitim eksikliği, yapılan işe ve ortama uygun olmayan kişisel koruyucu donanım kullanılması potansiyel risk durumlarını artırmaktadır [4, 9, 10, 11]. Bilgi ve iletişim teknolojileri verimliliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği sağlamak ve artırmak için birçok sektörde kullanılmaktadır [8, 12].

Akıllı sensörler, nesnelerin interneti (IoT), simülasyonlar, yapay zekâ, artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, veri analizi gibi akıllı teknolojiler kişisel koruyucu donanımlara entegre edilerek veya bu teknolojilerle birlikte olacak şekilde kullanılmaktadır [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Belirtilen teknolojiler çalışanların nabız ve vücut sıcaklığının takibini yapmak [19, 20], çalışanın psikolojik durumlarını belirlemek [21, 22] toz, gürültü, aydınlatma, yükseklik, gaz gibi etkenleri tespit etmek [23, 24, 25], acil duruma neden olan riskler ve acil durum esnasında çalışanları uyarı ve sinyal almak, uyarmak, karar alma, acil durum ekiplerine haber vermek [26], çalışma ortamının anlık izlenmesinin yanında çalışanın iş yeri ortamında konumunun anlık belirlemek [27, 28, 29], çalışanların davranışlarının davranışlarını gözlemlemek, analiz etmek ve değiştirmek [30], izinsiz girişleri engellemek [31], çalışanların kişisel koruyucu donanımları kullanıp kullanmadıklarını takip etmek [32], nesnelerden kaynaklı darbeleri ölçmek amacıyla kullanılmaktadır. Bahsi geçen uygulamalar gerçek zamanlı izleme ve risk

azaltmayı mümkün kılmakta ve bu sayede çalışanın sağlık, güvenlik ve refahını korumayı, geliştirmeyi ve iyileştirmeyi sağlamaktadır.

Veri toplama, verinin depolanması ve paylaşılması, analiz edilmesi, yorumlanması ile çalışma ortamının ve çalışanın izlenmesi ve konumunun belirlenmesi, kişisel koruyucu donanımın kullanılıp kullanılmadığının takibinin yapılmasında akıllı teknolojiler kullanılmaktadır. Kullanılan akıllı teknolojiler çalışma ortamının çalışan için uygun hale getirilmesine, işin çalışanın fiziksel, ruhsal ve sosyal yönden uygun olmasına, çalışma şartlarından ve tekrarlayan hareketlerden kaynaklı olarak çalışanın sağlığının ve refahının korunmasına, riskli davranışların ve durumların önlenerek güvenliğin sağlanmasına yönelik çalışmaların ve uygulamaların yapılmasına imkân vermektedir. Koruma, önleme, izleme, yer belirleme, takip amacıyla akıllı teknolojilerle entegre edilmiş kişisel koruyucu donanımlar inşaat, maden, sağlık başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır [11, 20, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]. Yüksek koruma gücü, tekrar kullanmaya imkân vermesi, kendi kendini sterilize etme, çevre kirliliğinin azalmasına katkı sağlanması özelliklerine rağmen [41] akıllı teknolojilerde özellikle giyilebilir teknolojilerden kaynaklı olarak elektrik akımına maruz kalma, yanma ve patlama durumları meydana gelebilmektedir. İnsan vücudu ve cildi ile temas eden bu ürünler için insanın sağlığı ve güvenliğine etkisi kadar performansı, mahremiyet, gizlilik ve güvenilirliği konusunda endişeler bulunmaktadır [42, 43]. Ayrıca akıllı teknolojilere sahip ürünlerin şarj edilmesi gerekliliği ve dış etkenlerden (Darbe, hava şartları vb.) teknolojilerin çok kolay etkilenmesi, görüntülerin alınmasında engeller oluşması, tanınmada sorunlar meydana gelmesi, kalibrasyona gerek duyulması, gerilmelerden etkilenmesi, standartların ve sertifikasyonların sınırlı olması, maliyet, eğitim gibi durumlar akıllı teknolojilerin kişisel koruyucu donanımlarda kullanılmasında geliştirilmesi gereken alanlar olduğunu göstermektedir [10, 44].

Yapılan işe, kullanılan malzeme ve makineye, yürütülen sürece, çalışma ortamı koşullarına, çalışanın fiziksel özelliklerine uygun olarak seçilen doğru kişisel koruyucu donanımların kullanıcılar tarafından kişisel koruyucu donanımın kullanma talimatlarına, teorik ve pratik eğitimde verilen bilgilere göre kullanılması sağlıklı ve güvende olmaya deste olmaktadır. Kişisel koruyucu donanımların temini, bakımı, yenilenmesi konusunda işverene; kişisel koruyucu donanımların belirlenen kurallara dahilinde doğru kullanılması ve muhafazası konusunda çalışanlara güven duyulması iş sağlığı ve güvenliği konusunda iyileştirici ve geliştirici olmakta ve güvenlik kültürünün gelişmesine katkı sunmaktadır.

Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlarda ergonomik ve estetik tasarım, sensör teknolojisi kullanımı, dijitalleşme ve veri yönetimi ön plana çıkmaktadır.

Tablo 1. Yeni Nesil Kişisel Koruyucu Donanımlar ve Özellikleri

Ergonomik ve Estetik Tasarım	Kullanıcı konforunu artırmak amacıyla ergonomik ve estetik tasarım ilkelerine uygun olarak geliştirilmiştir. Örnek: Geleneksel koruyucu başlıkların aksine, yeni tasarımlar daha hafif malzemelerden üretilmiş ve kullanıcının baş yapısına uyum sağlayacak şekilde ayarlanabilir özellikler eklenmiştir.
Sensör Teknolojileri	Yeni nesil KKD'ler, kullanıcı sağlığını izlemek ve çevresel riskleri tespit etmek amacıyla sensör teknolojileriyle donatılmıştır. Örnek: Eldiven, giyişi ve barete entegre edilen sıcaklık, nem, toz, gaz sensörleri, kullanıcının maruz kaldığı çevresel koşulları gerçek zamanlı olarak izleyebilmektedir.
Dijitalleşme ve Veri Yönetimi	Yeni nesil KKD'ler, dijitalleşme ve veri yönetimi alanında önemli yenilikler sunmaktadır. Örnek: Akıllı koruyucu gözlükler, kullanıcının görüş alanını artırmak ve çevresel verileri anlık olarak görüntülemek için AR (Artırılmış Gerçeklik) teknolojisini kullanmaktadır.

Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar ile geleneksel kişisel koruyucu donanımların özellikleri karşılaştırıldığında aralarında belirgin farklılıklar bulunmaktadır.

Tablo 2. Geleneksel Kişisel Koruyucu Donanım- Yeni Nesil Kişisel Koruyucu Donanım Özellikleri

Özellik	Geleneksel KKD	Yeni Nesil KKD
Malzeme	Ağır ve sert	Hafif ve esnek
Sensör Teknolojisi	-	Entegre sensör
Dijital Özellik	-	AR ve veri yönetimi
Ergonomik Tasarım	Sınırlı	Kullanıcı uyumu (Fit Test yapılmaktadır.)

Yapılan iş ve çalışma ortamına uygun kişisel koruyucu donanımın belirlenmesi, kişisel koruyucu donanımların kullanılması, muhafaza edilmesi, temizlenmesi ve gerekliliği konusunda eğitim eksikliği, güven ve güvenilirlik ve kullanım kolaylığına ilişkin endişe, maliyet, teknolojik alt yapının eksikliği, sertifikasyon ve standart eksikliği, akıllı teknolojiler ve bu teknolojilerin kişisel koruyucu donanımlarda kullanılması hakkında karar verici (İşveren) ve rehberlik yapanların (İş güvenliği uzmanı, işyeri

hekimi) bilgi ve deneyim eksikliği akıllı kişisel koruyucu donanımların iş sağlığı ve güvenliğinde kullanılması konusunda engel olabilmektedir. Bu çalışma akıllı kişisel koruyucu donanımlara ilişkin görüşleri ve Türkiye’de kullanımı hakkında bilgiler sektörde yer alan kişilerden alınan bilgilerle sunulmaktadır.

III. YÖNTEM

Bu çalışma, nitel araştırma yaklaşımı benimsenerek gerçekleştirilmiştir. Üretim ve hizmet alanında yer alan yapı -inşaat, zemin işleri-, eğitim -üniversite-, medya, danışmanlık, eğitim, telekomünikasyon olmak üzere farklı sektörlerdeki altı (6) uzmanla görüşmeler yapılmış ve bu görüşmelerde nitel araştırmalarda sıklıkla kullanılan bir veri toplama yöntemi olan yarı yapılandırılmış soru tekniği kullanılmıştır. Bu teknik hem esneklik kazandırması hem de tutarlılığı korumak amacıyla tercih edilmiştir. Önceden hazırlanmış soru seti katılımcılara yönlendirilmesine ve katılımcıdan gelen cevaba göre ek sorular sormaya imkân vermesi ve bu sayede cevabın derinleştirilmesini sağlaması ayrıca bu yöntemin kullanılmasını gerekli kılmıştır. Belirlenen konu çerçevesinde katılımcıların düşüncelerini ve deneyimlerini daha detaylı ifade etmelerine imkân veren yarı yapılandırılmış 21 soru yönlendirilmiştir. Verilerin sistematik bir şekilde özetlenmesine, sınıflandırılmasına ve yorumlanmasına olanak sağlayan betimsel analiz tekniği nitel araştırma yöntemlerinde çoğunlukla tercih edilmektedir. Bu yöntemde veriler doğrudan katılımcının ifadesine dayanarak betimlenmekte, veriler tema, kategori ve model şeklinde organize edilmektedir. Verilerin doğal halde sunulmasına, verilerin anlaşılır ve sistematik şekilde olmasına, araştırmacının yorumunu minimum düzeyde tutmasına, katılımcının düşüncelerini ön plana çıkarmasına, bulguların net olmasına imkân vermesi sebebiyle yöntemsel olarak betimsel analiz tekniği uygulanmıştır. Elde edilen veriler kodlanarak temalar altında toplanmıştır. Örneklem grubu farklı sektörlerde çalışan iş güvenliği uzmanlarından ve yöneticilerden oluşmaktadır. Uzmanların yönlendirme yöntemi kullanılmıştır; bölgelerinin en az beş yıllık deneyime sahip olması kriteri aranmıştır. Mülakatlar yüz yüze gerçekleştirilmiş, bir görüşmesi ortalama 45 dakika sürmüştür. Araştırma süreci boyunca bilgilerin gizliliği ve tüm görüşmelerden önce bilgilendirilmiş onam alınmıştır. Çalışmada katılımcılar X1, X2, X3, X4, X5, X6 olarak kodlanmıştır.

III. BULGULAR

Katılımcılara yönlendirilen sorular ve katılımcılar verilen cevaplar analiz edilerek verilmiştir.

“İş yerinizde yeni nesil kişisel koruyucu donanım (Akıllı teknolojilerle entegre edilmiş kişisel koruyucu donanım) kullanıyor musunuz?”

Katılımcılar arasında sektör farkı nedeniyle kişisel koruyucu donanım kullanımında büyük çeşitlilik gözlemlenmiştir. Medya ve danışmanlık gibi sektörlerde doğrudan kişisel koruyucu donanım ihtiyacı az

görülmekte; bazıları (X3 ve X4) ise teknolojik çözümleri güvenlik amaçlı kullanılmaktadır. Diğer yandan, tehlike sınıfı düşük olan iş yerlerinde (X2, X5, X6) kişisel koruyucu donanım ihtiyaç duyulmadığı ifade edilmiştir.

Genel olarak medya sektöründe (X1) kişisel koruyucu donanım kullanımı savaş bölgesi gibi özel durumlarla sınırlıdır. Giyilebilir teknoloji (X3) ve hareketsizlik sensörleri (X4) gibi yeni nesil güvenlik çözümleri bazı sektörlerde tercih edilmektedir. Düşük tehlike sınıfında yer alan iş yerlerinde (X2, X5, X6) kişisel koruyucu donanım kullanılmamakta ve eğitim veya denetim süreçlerine önem verilmediği görülmektedir.

“Akıllı baret, Akıllı Gözlük, Akıllı Hareket Kontrolü, E-Eldiven, Akıllı İç Taban, Etkin Aydınlatma Yeleği olan yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar hakkında bilgiye sahip misiniz?”

Katılımcılar, akıllı kişisel koruyucu donanımlar hakkında bilgi sahibi olsa da bu tür teknolojilerin Türkiye’de yaygın olarak uygulanmadığını vurgulamıştır. Yanıtların ortak noktaları, akıllı kişisel koruyucu donanımların yüksek maliyetleri ve Türkiye’deki firmaların düşük bilinç düzeyinin, kullanımını sınırladığı yönündedir.

Genel bulgulara bakıldığında:

- Yüksek maliyet ve tedarik zorlukları (X1, X4): Akıllı donanımların döviz bazlı fiyatlandırılması, firmaların bu ekipmanlara yatırım yapmasını zorlaştırmaktadır.
- Yurt dışı uygulamaları (X2): Türkiye’de yaygın olmasa da, yurt dışında özellikle İngiltere’de akıllı kişisel koruyucu donanım uygulamalarının kullanıldığına dair örnekler verilmiştir.
- Sektörel farklılıklar (X5): Akıllı kişisel koruyucu donanım daha çok kurumsal firmalar ve fabrikalarda kullanıldığı, ancak inşaat gibi sektörlerde uygulanmadığı belirtilmiştir.
- Bilgi takibi (X6): Teknolojik gelişmelerin takip edildiği, ancak somut uygulama yapılmadığı ifade edilmiştir.

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar ile ilgili kullanım eğitimi iş yerinizde nasıl veriliyor ve verdiğiniz eğitimlerin verimlilik düzeyleri nelerdir?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanım eğitiminin verilmemesini veya sınırlı düzeyde uygulandığını göstermektedir. Eğitimlerin verilmemesinin temel nedenleri arasında kişisel koruyucu donanım kullanımının yaygın olmaması, farklı sektörlerin ihtiyaçlarının farklılık göstermesi ve mevcut teknolojilere yeterli yatırım yapılmaması öne çıkmaktadır.

Genel bulgular:

- Kişisel koruyucu donanım kullanım eksikliği (X1, X2, X5): Yeni nesil kişisel koruyucu donanım kullanılmadığı için eğitim verilmediği sıkça belirtilmiştir. Özellikle inşaat gibi dinamik sektörlerde bu tür teknolojilerin uygulanmasının zor olduğuna dikkat çekilmiştir.
- Örnek olma ve farkındalık yaratma (X4): İş güvenliği uzmanlarının sahada çalışanlara örnek olması gerektiği vurgulanmıştır. Kişisel koruyucu donanım kullanımının teşvik edilmesi için liderliğin önemi öne çıkarılmıştır.
- Mobil cihazlar ve veri akışı (X5): Mobil cihazlarla veri takibi yapmanın iş güvenliği açısından faydalı olabileceği ve pandemide bu tür teknolojilerin etkin kullanıldığı belirtilmiştir.
- Sektörel farklılıklar (X2): Otomasyon ve fabrikalarda akıllı kişisel koruyucu donanımların daha verimli kullanılabileceği, ancak inşaat sektöründe bu tür uygulamaların karşılık bulmadığı ifade edilmiştir.

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanım kullanımı açısından çalışanların bilinçlenmesi ve bilgilendirilmesi, teşvik edilmesi için ne tür uygulamalarınız bulunmakta ve geliştirilmesi için neler yapıyorsunuz?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanım kullanımında eğitim ve bilinçlendirme süreçlerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Eğitimlerin planlanmasında ekonomik koşullar, sektörel farklılıklar ve teknolojik donanımın fayda- risk analizi gibi unsurlar öne çıkmaktadır.

Genel bulgular:

- Uzaktan eğitim planları (X1): Eğitimlerin uzaktan verilmesi fikri tartışılmakta ve eğitim planlarına eklenmesi düşünülmektedir.
- Pratik eğitim ve deneyim (X2, X3): Yeni teknolojilerin ancak sahada test edilerek etkin kullanılabileceği ve eğitimlerin gerçek deneyimlerle desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır.
- Ekonomik engeller (X4): Firmaların ancak kazalar veya cezalar sonrasında kişisel koruyucu donanımına önem verdikleri, maliyetlerin ise en büyük engellerden biri olduğu belirtilmiştir.
- Çalışanların bilinçlenmesi (X5): Çalışanların sağlığını koruma motivasyonu ön plana çıkarılarak kişisel koruyucu donanım eğitimlerinin daha etkili hale getirilebileceği öne sürülmüştür. Ayrıca, çalışanların geri bildirimlerinin gelecekteki eğitimlerin kalitesini artıracığı belirtilmiştir.

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların geleneksel kişisel koruyucu donanımlara göre avantajları ve dezavantajları sizce nelerdir?”

Katılımcılar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların geleneksel kişisel koruyucu donanımlara göre çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahip olduğunu belirtmiştir. Avantajlar arasında risklerin önceden

tespiti, proaktif önlem alınması, veri sağlama ve ergonomi ön plana çıkarken, maliyet, temin zorlukları, eğitim sürecinin uzunluğu ve arızalanma riskleri gibi faktörler dezavantaj olarak dile getirilmiştir. Ayrıca, çalışan davranışları ve ekipmanların sabote edilmesi de önemli bir zorluk olarak ifade edilmiştir.

Avantajlar:

- Proaktif önlemler: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar, kazaları önceden tespit ederek önlem alınmasını sağlıyor (X1, X2).
- Verimlilik ve ergonomi: Teknoloji kullanımı, iş yerinde üretkenliği ve ergonomiyi artırıyor (X3).
- Daha az personelle güvenli çalışma: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların sahada güvenliği artırarak daha az iş gücüyle çalışma imkânı sağladığı belirtiliyor (X5).

Dezavantajlar:

- Maliyet ve temin zorlukları: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların yüksek maliyeti ve döviz bazlı fiyatlandırma, yaygınlaşmasını engelliyor (X2, X6).
- Uzun eğitim ve adaptasyon süreci: Eğitimlerin etkili olması için uzun süreli adaptasyon gerektiği ifade ediliyor (X2).
- Suistimal ve sabotaj riski: Çalışanların ekipmanları doğru kullanmaması ve suistimal etmeleri, her iki kişisel koruyucu donanım türü için de zorluk oluşturuyor (X4).
- Arıza ve bilgi hatası: Elektronik ekipmanların bozulma ve hatalı veri sağlama riski var (X5).

“Yeni nesil teknoloji kişisel koruyucu donanım ile geleneksel kişisel koruyucu donanım arasındaki verim açısından nasıl farklılıklar gözetiyorsunuz?”

Katılımcılar, verimlilik açısından yeni nesil kişisel koruyucu donanımların geleneksel ekipmanlara göre önemli avantajlar sağladığını düşünmektedir. Ancak teknolojik karmaşıklık, alışkanlık eksikliği ve maliyetlerin yüksekliği gibi faktörler bu ekipmanların yaygın kullanımını sınırlandırmaktadır.

Verimlilik Artışına Katkılar:

- Veri toplama ve analiz: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar ekipmanın kullanımına dair veriler sunarak iş kazalarını önleme sürecinde proaktif çözümler sunuyor (X2, X5).
- Gözlem kolaylığı: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar ile saha gözlemleri sadece uzmanlara bağlı kalmadan otomatik olarak yapılabilir (X5).
- İletişim desteği: Teknolojik ekipmanlar, çalışanlar arasında iletişimi güçlendirerek iş güvenliğini artırıyor (X2).

Dezavantajlar ve Zorluklar:

- Kullanım alışkanlıklarının değişmesi: Teknolojiye alışık olmayan çalışanlar için yeni ekipmanların kullanımı zor olabilir (X2).
- Maliyet ve erişim zorlukları: Yüksek maliyet ve ekipmanların temin zorlukları, bu teknolojilerin yaygınlaşmasını zorlaştırıyor (X2).

- Koruma açısından fark: Bazı katılımcılar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların koruma açısından geleneksel ekipmanlardan daha üstün olmadığını düşünüyor (X6).

“Sizce yeni nesil kişisel koruyucu donanımların iş sağlığı ve güvenliği kültürüne ve çalışanların davranış değişikliğine etkisi nasıl olur? Mevcut olumsuzlukların yeni nesil kişisel koruyucu donanımlarla daha iyi önlenebileceğini düşünüyor musunuz?”

Katılımcılar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların iş sağlığı ve güvenliği kültürüne olumlu katkılar sağlayacağını, ancak bazı psikolojik ve operasyonel zorluklar yaratabileceğini ifade etmiştir. Çalışan davranışlarının değiştirilmesi ve güvenlik kültürünün geliştirilmesi için bu ekipmanların etkin bir şekilde kullanılması gerektiği öne çıkmaktadır.

Olumlu Etkiler:

- Farkındalık ve dikkat artışı: Çalışanların sürekli izlendiklerini bilmeleri, kurallara uyumlarını artırarak daha dikkatli çalışmalarına katkı sağlar (X2, X5, X6).
- İş güvenliği süreçlerinin kolaylaşması: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar veri toplama ve anlık müdahale imkânı sunarak iş güvenliği süreçlerini kolaylaştırır (X1, X2).
- Kayıp ve kötüye kullanımın önlenmesi: Ekipmanların takip edilmesi, kaybolma veya kötüye kullanım durumlarını engelleyebilir (X5).

Zorluklar ve Olumsuz Etkiler:

- Psikolojik baskı ve mobbing algısı: Çalışanların sürekli izlenme hissi, psikolojik baskı yaratabilir ve motivasyonu olumsuz etkileyebilir (X3, X5).
- Yasal düzenleme eksikliği: Türkiye’de yeni nesil kişisel koruyucu donanımlara dair yeterli yasal düzenleme ve kılavuzların olmaması, bu ekipmanların kullanımını sınırlamaktadır (X3).
- Eğitim ihtiyacı ve alışkanlıklar: Teknolojilerin etkin kullanımı için eğitim şarttır. Ayrıca, çalışanların yeni ekipmanlara uyum sağlaması zaman alabilir (X3, X4).
- Zorlama yöntemlerinin etkisizliği: Güvenlik kültürünün, zorlamadan çok bilinçlendirme ile geliştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (X4).

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların tasarımı ve kullanımında karşılaşılan en büyük zorluklar ve fırsatlar sizce nelerdir?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların tasarımı ve kullanımında kültürel, teknolojik, ekonomik ve ergonomik zorlukların yanı sıra bazı fırsatlar sunduğunu göstermektedir. Estetik tasarım, yerli üretim teşviki ve veri yönetimi altyapısının geliştirilmesi gibi faktörler, ekipmanların kullanımını artırma potansiyeline sahiptir.

Karşılaşılan Zorluklar:

- Kültürel farklılıklar ve kullanım alışkanlıkları: Ekipmanların kullanımının, ülkelerin iş güvenliği kültürlerine göre uyarlanması gerektiği belirtiliyor (X2, X4).
- Maliyet ve teknolojik altyapı: Ekipmanların yüksek maliyetleri ve döviz bazlı fiyatlandırma yaygınlaşmayı zorlaştırıyor. Küçük firmalar için veri yönetim altyapısı eksikliği büyük bir engel olarak görülüyor (X3, X5).
- Psikolojik ve estetik faktörler: Çalışanların ekipmanları rahatsız veya çirkin bulmaları, kullanım oranını düşürebilir (X4).
- Alerjen ve dayanıksız malzemeler: Ekipmanların malzeme kalitesinin yetersiz olması, kullanım ömrünü kısaltabilir ve çalışan sağlığını olumsuz etkileyebilir (X5).

Fırsatlar:

- Ergonomik ve estetik tasarım: Ekipmanların görünürlüğünün artırılması, kullanım oranlarını yükseltebilir (X4).
- Yerli üretimin teşviki: Yerli üreticilerin devlet desteği ile yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar geliştirmesi, maliyetleri düşürebilir ve bağımlılığı azaltabilir (X3).
- Veri yönetimi ile kayıpların önlenmesi: Yeni nesil kişisel koruyucu donanım izleme ve veri analizi imkânı sunarak ekipman kaybını önleyebilir ve verimliliği artırabilir (X5).
- İşe uygun tasarım: Estetikten ziyade güvenliğe odaklanan tasarımlar, iş sağlığı ve güvenliği süreçlerini iyileştirebilir (X6).

“Akıllı kişisel koruyucu donanımların iş sağlığı ve güvenliğine entegrasyonunda yaşanan sorunlar nelerdir?”

Katılımcıların yanıtları, akıllı kişisel koruyucu donanımların entegrasyon sürecinde bazı operasyonel ve eğitimsel zorluklar yaşandığını ancak avantajlı yönlerinin ağır bastığını göstermektedir. Temel sorunlar arasında eğitim eksikliği, yasal düzenleme yetersizliği ve maliyetlerin yüksekliği öne çıkmaktadır.

Entegrasyon Sürecinde Karşılaşılan Sorunlar:

- Eğitim Eksikliği: Çalışanların akıllı kişisel koruyucu donanımları verimli şekilde kullanabilmesi için eğitimlerin yetersiz kalması önemli bir sorun olarak görülüyor (X3).
- Yasal Düzenlemelerin Eksikliği: İş sağlığı ve güvenliği politikalarının yasal olarak korunmaması, entegrasyonun önünde bir engel oluşturuyor (X3).
- Maliyetlerin Yüksekliği: Akıllı kişisel koruyucu donanımların yüksek maliyetleri, organizasyonlar için ciddi bir yük oluşturuyor (X3).
- Zaman Gereksinimi: Teknolojinin etkilerinin görülebilmesi için zamana ihtiyaç var, dolayısıyla entegrasyon süreci zaman alabiliyor (X6).

Potansiyel Fırsatlar:

- Dijitalleşme ile uyum: Akıllı kişisel koruyucu donanımların entegrasyonu, dijitalleşmenin sunduğu fırsatlara benzer şekilde iş güvenliği süreçlerine pozitif katkı sağlayabilir (X1).
- Kullanıcı Odaklı Yaklaşım: Kullanıcı kitlesine uygun uygulamalar ve uyum süreçleri geliştirildiğinde entegrasyon daha başarılı olabilir (X6).

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların piyasaya sürülmesi ve kullanılması için hangi yasal ve etik standartlar ve kriterler gereklidir?”

Katılımcılar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların piyasaya sürülmesi ve kullanılabilmesi için mevcut yasal düzenlemelerin geliştirilmesi ve etik standartların belirlenmesi gerektiğini ifade etmektedir. Kişisel veri gizliliği, uluslararası sertifikasyon, ekonomik sürdürülebilirlik ve sorumluluk mekanizmaları, bu ürünlerin kullanımında önemli faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Gereken Yasal ve Etik Standartlar:

- Yasal düzenlemelerin güncellenmesi: Mevcut kişisel koruyucu donanım yönetmeliklerinin teknolojik gelişmelere göre yenilenmesi gereklidir (X1, X2, X4).
- Kişisel veri gizliliği (KVKK): Çalışanların sağlık ve konum verilerinin işlenmesi için etik kurallar ve güvence mekanizmaları sağlanmalıdır (X3, X5).
- CE sertifikasyon ve barkodlama: Ürünlerin uluslararası standartlara uygun üretilmesi ve sertifikalandırılması gereklidir (X5, X6).
- Üretici ve ithalatçı sorumluluğu: Kişisel koruyucu donanımları piyasaya süren kişi veya kuruluşların, yaşanacak olumsuzluklarda sorumlu tutulmaları gerektiği belirtilmiştir (X6).

Zorluklar:

- Hukuki belirsizlikler: Türkiye’de mevcut mevzuatın açık hedefler koymaması ve uygulamada eksiklikler yaşanması, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların entegrasyonunu zorlaştırabilir (X4).
- Ekonomik engeller: Akıllı kişisel koruyucu donanımların maliyetlerinin yüksek olması, işverenlerin bu ürünlere geçişini zorlaştırmaktadır (X4).
- Ergonomi ve erişim: Ekipmanların her yaş ve demografik yapıya uygun olarak tasarlanması gereklidir (X3).
- Veri kaybı riski: Dijital altyapının çökmesi durumunda verilerin korunması için yedekleme ve güvenlik önlemleri alınması gereklidir (X5).

Fırsatlar:

- Uluslararası uyum: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların uluslararası standartlarla uyumlu olması, küresel pazarda kabul görmesini sağlayabilir (X6).

- Veri destekli iş güvenliği: Toplanan verilerin analiz edilerek iş güvenliği süreçlerinin iyileştirilmesi mümkündür (X3).
- Yasal düzenleme fırsatı: Türkiye'deki iş sağlığı ve güvenliği mevzuatının, teknolojik gelişmelere göre geliştirilmesi ve genişletilmesi bir fırsat yaratabilir (X2, X4).

"Akıllı teknolojik donanımların kullanımıyla ilgili güvenlik ve gizlilik endişeleri nelerdir?"

Katılımcıların yanıtları, akıllı teknolojik kişisel koruyucu donanımların kullanımında veri gizliliği, siber güvenlik, teknolojik arızalar ve mahremiyet konularının önemli zorluklar olarak öne çıktığını göstermektedir. KVKK uyumu, çalışan mahremiyetinin korunması ve teknolojik altyapının güvenilirliği gibi konularda önlemler alınması gereklidir.

Başlıca Güvenlik ve Gizlilik Endişeleri:

- Veri gizliliği: Çalışanların konum ve sağlık verilerinin toplanması, KVKK gibi veri koruma kurallarına uyulmasını gerektiriyor (X1, X3).
- Mahremiyetin ihlali: Çalışanların sürekli izlenme hissi, psikolojik baskıya neden olabilir ve ergonomik ihtiyaçları olumsuz etkileyebilir (X4).
- Teknolojik arızalar: Sensörler, bataryalar ve sinyal alışıverişindeki problemler, akıllı kişisel koruyucu donanımların güvenilirliğini zayıflatırabilir (X4).
- Siber güvenlik: Teknolojik ekipmanların verilerini korumak için güçlü siber güvenlik önlemleri alınmalıdır (X2).

Alınabilecek Önlemler:

- KVKK ve veri gizliliği politikaları: Çalışanların kişisel verilerinin korunması için KVKK uyumlu gizlilik sözleşmeleri hazırlanmalıdır (X1, X3).
- Siber güvenlik sistemlerinin iyileştirilmesi: Veri güvenliği, güçlü güvenlik bariyerleri ile korunmalı ve teknolojik denetimler yapılmalıdır (X2).
- Mahremiyet dostu çözümler: Çalışanların izlenme hissini azaltmak için ergonomik dinlenme aralıkları sağlanmalı ve gereksiz takip önlenmelidir (X4).
- Teknolojik arızalara karşı yedekleme: Batarya ve sensör gibi bileşenlerin düzenli bakımı yapılmalı ve yedek sistemler geliştirilmelidir (X4).

"Akıllı teknolojik donanımların kullanımıyla ilgili güvenlik ve gizlilik endişeleri gidermek için ne gibi önlemler alınabilir?"

Katılımcılar, güvenlik ve gizlilik endişelerini gidermek için KVKK uyumlu süreçlerin geliştirilmesi ve özel yönetmeliklerin çıkarılması gerektiğini vurgulamaktadır. Çalışanların kişisel verilerinin güvenliğini sağlamak için yasal düzenlemelerin netleştirilmesi ve onay mekanizmalarının dijitalleştirilmesi önemlidir.

Önerilen Önlemler:

Kişisel Verileri Korunma Kanunu (KVKK) Uyumlu Onay Süreçleri (X1):

- Çalışanlara, aydınlatma metinleri dijital yollarla gönderilerek onayları alınmalıdır.
- Hukuk birimi tarafından hazırlanan dokümanlar, çalışanların gizlilik haklarını güvence altına almalıdır.

Yönetmeliklerin Hazırlanması (X3):

- Yeni nesil KİŞİSEL KORUYUCU DONANIM'ların kullanımına yönelik yönetmelikler hazırlanmalıdır.
- Yönetmeliklerde ekipmanların tanımları, veri işleme süreçleri ve kullanım amacı netleştirilmelidir.
- Devletin, veri güvenliğini garanti altına alacak güvence mekanizmaları oluşturması gereklidir.

"Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların işverenler, çalışanlar ve üreticiler üzerindeki maliyet, etkinlik ve rekabetçilik açısından etkisi nasıl olacak?"

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların maliyet, etkinlik ve rekabetçilik açısından işverenler, çalışanlar ve üreticiler üzerinde farklı etkiler yaratacağını göstermektedir. Yüksek maliyetler, işverenlerin bu ekipmanları benimsemesini zorlaştırabilirken, rekabetin gelişmesiyle maliyetlerin düşmesi ve ekipmanların daha yaygın kullanılabilmesi öngörülmektedir.

Maliyet ve Etkinlik:

- Yüksek maliyetler: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar döviz bazlı fiyatlar nedeniyle pahalıdır ve işverenler için ek maliyet yaratır (X1, X2, X5).
- Verimlilik artışı: İş kazalarının ve meslek hastalıklarının azalması, üretkenliği artırarak uzun vadede maliyetleri düşürebilir (X4, X5).
- Devlet desteği ve teşvikler: Eğitim belgeleri ve teşvikler, ekipmanların maliyetlerini dengeleyebilir (X5).

Rekabetçilik:

- Erken yatırımın önemi: Erken yatırım ve Ar-Ge yapan firmalar pazar lideri olabilir, ancak bu durum kartelleşmeye yol açabilir (X3).
- Rekabetin maliyetlere etkisi: Rekabetin artması, teknolojik ekipmanların maliyetlerini zamanla düşürebilir (X3, X5).
- Sektörel farklılıklar: Bazı sektörlerde ekipmanların daha fazla maliyet yaratabileceği öngörülmektedir (X6).

Öneriler:

- Devlet teşvikleri: Eğitim ve teşvik programları ile işverenlerin yeni nesil kişisel koruyucu donanımlara geçiş yapmaları kolaylaştırılabilir (X5).
- AR-GE ve yerli üretim: Yerli üretimin teşvik edilmesi, maliyetleri düşürebilir ve firmaların rekabet gücünü artırabilir (X3).

- Uzun vadeli fayda: kişisel koruyucu donanımların kullanımı ile iş kazaları ve hastalıkların azalması, uzun vadede işverenlere ve devlete ekonomik fayda sağlayabilir (X4).

“Peki çalışan ve iş yeri performansına etkisini nasıl olur?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların çalışanların motivasyonuna, güvenliğine ve iş yeri performansına önemli katkılar sağlayacağını göstermektedir. Zaman tasarrufu, ergonomik iyileştirmeler ve doğru bilgi akışı, iş süreçlerini daha verimli hale getirmeye yardımcı olacaktır.

Performansa Etkileri:

- Motivasyon ve moral artışı: Çalışanlar, kendilerine değer verildiğini hissettiklerinde daha motive çalışacak ve performansları artacaktır (X1).
- Güvenlik hissinin artması: Yeni nesil Kişisel Koruyucu Donanımlar, çalışanların kendilerini daha güvende hissetmelerini sağlayarak iş verimliliğine katkıda bulunacaktır (X1).
- Hataların azalması ve doğru müdahale: Teknolojik çözümler, çalışanlara doğru bilgi akışı sunarak hataların azaltılmasını sağlar (X2).
- Zaman ve ergonomi avantajları: Teknolojik ekipmanlar, zaman tasarrufu sağlarken iş ortamını daha ergonomik hale getirerek performansı artırır (X3).

“Yeni nesil yani bu bahsettiğimiz kişisel koruyucu donanımların sizce ilerleyen zamanlarda zorunlu olması gerekir mi?”

Katılımcılar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların zorunlu hale gelmesinin belirli durumlara ve koşullara bağlı olması gerektiğini ifade etmektedir. Özellikle yüksek riskli işlerde kullanımı gerekli görülürken, gereksiz kontrol ve izleme amaçlı zorunlulukların insanları olumsuz etkileyebileceği belirtilmiştir.

Zorunlu Kullanım Gerekliliği:

- Yüksek riskli işler: Kapalı alanlar, yüksekte çalışma, radyasyon gibi tehlikeli işlerde yeni nesil kişisel koruyucu donanımların zorunlu hale getirilmesi gerektiği vurgulanıyor (X4, X5).
- Zamanla zorunlu olma ihtimali: Dijital süreçlerin henüz tam olarak yasal düzenlemeye tabi olmadığı gibi, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların zorunlu olması da zaman alabilir (X1).

Gereksiz Kontrole Karşı Eleştiriler:

- Gereksiz izleme: kişisel koruyucu donanımların sadece çalışanları kontrol etmek için kullanılması, çalışanların motivasyonunu ve rahatını olumsuz etkileyebilir (X4).
- İnsan faktörünün korunması: Günlük hayatta çalışanların gereksiz sıkı kontrol altında olmaması gerektiği ifade ediliyor (X4).

“Peki sizce siz bu konuda tek yetkili kişi olsaydınız? İşyerinde yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar mı

yoksa geleneksel eski tarz kişisel koruyucu donanımlar mı kullanılır?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların tercih edilmesi gerektiğini, ancak ekonomik koşullar, kültürel uyum ve bilimsel güvenlik gibi faktörlerin dikkate alınmasının önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Yeni Nesil Kişisel Koruyucu Donanımların Tercihi ve Uygulama Stratejisi:

- Gelişim ve Yatırım: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar, teknolojik yatırımlarla ve AR-GE çalışmalarıyla desteklenmelidir (X3).
- Bilimsel Kanıt Gerekliliği: Kullanımın sağlığa zararsız olduğunun bilimsel olarak kanıtlanması gereklidir (X4).
- Şartlara Bağlı Uygulama: Şirketin kültürel ve ekonomik şartları uygun değilse, geleneksel kişisel koruyucu donanımlarla devam etmek mantıklı olabilir (X2).
- Maliyet ve Zaman Yönetimi: Kişisel koruyucu donanımların maliyetler göz önünde bulundurularak aşamalı olarak yenilenmesi önerilmektedir (X6).

Öne Çıkan Faktörler:

- Ekonomik Sürdürülebilirlik: Maliyetlerin yüksek olması, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların bir anda benimsenmesini zorlaştırabilir (X6).
- Kültürel Uyum: Şirket ve toplum, bu teknolojilere hazır değilse uygulama zorlukları yaşanabilir (X2).
- Bilimsel Güvenlik ve Etkinlik: kişisel koruyucu donanımların bilimsel olarak güvenli ve faydalı olduğu kanıtlanmalıdır (X4).
- Yasal Düzenlemeler: Teknolojik gelişmeleri destekleyen kanuni düzenlemeler ve teşvikler yapılmalıdır (X3).

“Akıllı, kişisel koruyucu donanımları, çalışanı ile uyumunu arttırmak için yapılan çalışmalar neler olabilir?”

Katılımcıların yanıtları, akıllı kişisel koruyucu donanımların çalışanlarla uyumunu artırmak için ergonomik tasarım, veri yönetimi ve eğitim gibi faktörlerin kritik olduğunu ortaya koymaktadır. İş güvenliği süreçlerine entegrasyon ve geri bildirim mekanizmaları ile ekipmanların etkinliği artırılabilir.

Uyumu Artırmak İçin Önerilen Çalışmalar:

Geri Bildirim ve İhtiyaca Göre Tasarım (X1):

- Çalışanlardan alınan geri bildirimlerle ekipmanların ihtiyaca uygun şekilde tasarlanması öneriliyor.
- Örneğin, önceden sinyal veren veya kaza sonrası konum bilgisi sağlayan ekipmanlar, çalışan güvenliğini artırabilir.

Stratejik Entegrasyon ve Eğitim (X3):

- Liderlik desteği, veri yönetimi ve çalışan eğitimi, akıllı kişisel koruyucu donanımların başarılı entegrasyonunda önemlidir.

- Güvenlik kültürünün geliştirilmesi, çalışanların bu teknolojileri benimsemelerini kolaylaştırır.

Yapay Zekâ ve Gelişen Teknolojiler (X4):

- Yapay zekâ ve robotik sistemlerin iş yerlerine entegrasyonu zaman alacak olsa da, bu teknolojilerin sanayiye uyarlanması kaçınılmazdır.
- Uzay ve havacılık gibi sektörlerdeki gelişmelerin günlük iş güvenliği süreçlerine yansması beklenmektedir.

Ergonomik ve Kullanıcı Dostu Tasarım (X6):

- Kişisel koruyucu donanımların ergonomik ve güvenli olması, çalışanlarla uyum açısından en önemli unsurdur.
- Kullanıcıya zarar vermeyen ve rahat kullanılabilen ekipmanlar tercih edilmelidir.

“Sizce ilerleyen zamanda kişisel koruyucu donanımlar nasıl gelişir veya nasıl da gelişebilir?”

Katılımcıların yanıtları, kişisel koruyucu donanımların gelecekte dijitalleşme, yapay zekâ, ergonomik tasarım ve yeni teknolojilerle gelişeceğini göstermektedir. Ekonomik ve kültürel koşullar, gelişim hızını belirlerken yeni teknolojiler ekipmanların daha etkili hale gelmesini sağlayacaktır.

Gelişim Öngörülere:

Dijitalleşme ve Veri Yönetimi:

- Kişisel koruyucu donanımların dijitalleşmesiyle, sensörler ve veri yönetimi iş güvenliğinde önemli bir yer alacaktır (X1, X4).

Yapay Zekâ ve İleri Teknolojiler:

- Yapay zekâ, artırılmış gerçeklik ve robotik sistemler, iş güvenliğini artırmak için kullanılabilir (X4, X6).
- Sesle kontrol edilen gözlükler, gaz ölçen sensörler gibi yeni teknolojik çözümler yaygınlaşacaktır (X4).

Ergonomi ve Kullanıcı Dostu Tasarım:

- Kişisel koruyucu donanımların hafif, ergonomik ve sade olması, çalışanların bu ekipmanları benimsemesini kolaylaştıracaktır (X3, X5).
- Simülasyon tabanlı eğitimlerin de kullanımını artıracığı belirtilmiştir (X5).

Kültürel ve Ekonomik Faktörler:

- Türkiye gibi bazı ülkelerde ekonomik ve kültürel engeller nedeniyle kişisel koruyucu donanımların gelişiminin yavaş olabileceği ifade edilmiştir (X2).

“Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların iş kazalarından ve meslek hasarlarını koruyabileceğini düşünüyor musunuz?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların iş kazalarını önlemede etkili olacağı görüşünde birleşirken, meslek hastalıklarına yönelik etkileri konusunda farklı görüşler ortaya çıkmaktadır. Özellikle, anlık veri ölçümü ve uyarı sistemleri gibi teknolojilerle iş güvenliğinin artırılacağı ifade edilmiştir. Ancak, donanım arızaları ve kullanım hataları gibi risklerin de dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir.

İş Kazaları ve Meslek Hastalıklarının Önlenmesi:

- Anlık uyarı sistemleri ve sensörler: Yeni nesil kişisel koruyucu donanımlar, iş kazalarını önceden uyararak önleme potansiyeline sahiptir (X1, X5).
- Meslek hastalıkları: Kimyasal maddeler, gürültü ve diğer risk faktörlerinin anlık izlenmesi meslek hastalıklarının önlenmesinde önemli bir rol oynar (X3). Ancak, bazı katılımcılar meslek hastalıkları konusunda kişisel koruyucu donanımların yeterli olup olmayacağından emin değildir (X1).

Riskler ve Zorluklar:

- Güç kaynağı ve sensör arızaları: kişisel koruyucu donanımların sensörlerin arızalanması gibi teknik sorunlarla karşılaşabileceği belirtilmiştir (X3).
- Kullanım zorunluluğu ve uyarılar: Ekipmanların kullanılmaması durumunda uyarı sistemlerinin devreye girmesi, kazaları önlemede etkili olabilir (X5).

Öne Çıkan Faktörler:

- Anlık veri ve uyarı sistemleri: İş güvenliği açısından anlık veri akışı ve uyarı sistemleri kritik öneme sahiptir.
- Teknik arızaların önlenmesi: Sensör ve güç kaynağı gibi teknik unsurların düzenli kontrol edilmesi gereklidir.
- Meslek hastalıkları ve uzun vadeli etki: kişisel koruyucu donanımların meslek hastalıkları üzerindeki etkileri hakkında daha fazla araştırma yapılmalıdır.
- Kullanım alışkanlıkları: Çalışanların ekipmanları düzenli kullanması, uyarı mekanizmalarıyla teşvik edilmelidir.

“Akıllı kişisel koruyucu donanımlarda teknolojik arızaların yol açtığı riskler ve bu risklerin önlenmesi için alınan tedbirler neler olabilir?”

Katılımcıların yanıtları, teknolojik arızaların neden olabileceği risklerin farkında olunması ve bu risklerin önlenmesi için önleyici tedbirlerin alınmasının önemine dikkat çekmektedir. Elektronik ekipmanların arızalanması, teknik destek eksikliği ve dikkat dağınıklığı gibi olası riskler vurgulanmıştır.

Teknik Arızaların Olası Riskleri:

- Yüksek arıza potansiyeli: Elektronik donanımların zorlu çalışma ortamlarında daha sık arızalanabileceği öngörülebiliyor (X1).
- Teknik destek eksikliği: Parça temini ve tamir süreçlerinin uzun sürmesi, işin aksamasına yol açabilir (X2).
- Aşırı güven ve rahvet: Çalışanların kişisel koruyucu donanımlara aşırı güvenmesi, iş disiplini olumsuz etkileyebilir (X6).
- Dikkat dağınıklığı: Uyarı mekanizmalarının çalışanları stres ve tedirginliğe sürükleyebileceği belirtiliyor (X5).

Önerilen Önlemler:

- Yedekleme ve bakım planları: Bozulan ekipmanların yedekleri sağlanmalı ve düzenli bakım yapılmalıdır (X1).

- Teknik kadroların eğitimi: kişisel koruyucu donanımların tamiri ve kullanımı için eğitilmiş teknik personel bulundurulmalıdır (X2).
- Uyumlu sektörlerin liderliği: Fabrika ve otomasyon sektörleri gibi daha stabil ortamlarda bu donanımlar öncelikle test edilmelidir (X2).
- Uyarı mekanizmalarının dengeli kullanımı: Uyarı sistemlerinin çalışan motivasyonunu olumsuz etkilemeyecek şekilde tasarlanması gerekir (X5).
- Rehabetin önlenmesi: Çalışanlar, kişisel koruyucu donanımların iş güvenliği sürecinin yalnızca bir parçası olduğunu bilmelidir; sürekli iş takibi yapılmalıdır (X6).

“Kullandığınız yeni tarzdaki kişisel koruyucu donanım çalışmayı zorlaştırıyor mu veya çalışma kabiliyetini azaltıyor mu?”

Katılımcıların yanıtları, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların ergonomik zorluklar yaratabileceği, ancak teknolojik gelişmelerle bu sorunların aşılabileceği yönünde ortak bir görüş sunmaktadır. Kullanıcı geri bildirimlerinin dikkate alınmasının, bu ekipmanların daha iyi hale getirilmesi için kritik olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, kişisel koruyucu donanım yönetmeliklerinin ekipmanların rahat ve güvenli olması gerektiğine dikkat çekilmiştir.

Zorluklar:

- Ergonomi ve Ağırlık: GPS, sensör ve işlemci gibi teknolojiler entegre edildiğinde ekipmanların daha ağır ve hantal olabileceği belirtiliyor (X3).
- Gözlük ve diğer akıllı donanımların büyüklüğü: Şu anki ekipmanların kompakt olmaması, kullanıcı deneyimini zorlaştırıyor (X3).

Öneriler ve Önlemler:

- Geri bildirim ve anketler: Kullanıcıların sahadan ilettikleri deneyimler dikkate alınarak ekipmanlarda iyileştirmeler yapılmalıdır (X5).
- Ergonomik tasarımın geliştirilmesi: Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte ekipmanların hafifletilmesi ve daha kompakt hale getirilmesi gerektiği belirtiliyor (X3).
- Yönetmeliklere uygunluk: Ekipmanların kişisel koruyucu donanım yönetmeliklerine uygun şekilde tasarlanması ve çalışanların işini aksatmaması gerektiği vurgulanıyor (X4).

IV. SONUÇ

Gelecekte kişisel koruyucu donanımlar yapay zekâ, artırılmış gerçeklik, dijitalleşme ve ergonomik tasarımlar ile daha akıllı hale gelecektir. Bu donanımlar, simülasyon destekli eğitimlerin düzenlenmesi, bilinçlendirme ve bilgilendirme çalışmalarının planlanması ve gerçekleştirilmesi, rahat, güvenli kullanılabilmesi ve çalışmayı kolaylaştırıcı olması için iyileştirmelerin sürekli yapılması kullanıcı dostu tasarım olmasına imkân vererek bu sayede yaygınlaşmasını sağlayacaktır. Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların (Akıllı teknolojilerle entegre edilmiş kişisel koruyucu donanım) her sektörde kullanılmadığı ve sektöre göre kullanımının farklılık

gösterdiği özellikle belirtilmiştir. Farklı yazarlar tarafından yapılan çalışmalarda da ölüm ve yaralanmaların önlenmesi için kazaların çokça yaşandığı inşaat, imalat, maden, sağlık sektörlerinde yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kullanıldığı ve teşvik edildiği belirtilmiştir [8, 15, 16]. Türkiye’de de yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kullanımının henüz sınırlı olduğu belirlenmiştir.

Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların çalışana uyumunu artırmak için geri bildirim mekanizmalarının geliştirilmesi ve uygulanması, ergonomik tasarımlar ve yapay zekâ gibi teknolojik gelişmelerin izlenmesi ve uyarlanması, eğitim ve bilinçlendirme çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu durum yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kaza ve hastalıklara neden olan tehlike ve risklerin belirlenmesi, önlenmesi ve sınırlandırılması, acil duruma neden olan bir kaza meydana geldiğinde uyarı ve bilgilendirmenin hızlı olması, çalışanlar tarafından sergilenen güvensiz davranışların analiz edilerek eğitim düzenlenmesi, kişisel koruyucu donanımların kullanımının takip edilmesi, bilinçlendirme çalışmalarının yapılması, çalışanın psikolojik durumunun belirlenmesinin iş kazaları ve meslek hastalıklarının azaltılmasına, iş sağlığı ve güvenliği kültürünün gelişmesine ve verimin artmasına imkân sağladığı özellikle vurgulanmıştır. Tehlike sınıfı fark etmeksizin tüm iş yerlerinde kullanılmasıyla gereksiz kontrol ve izleme uygulamalarından kaçınılması çalışanların kendilerini daha güvende hissetmesini sağlayacak, çalışanların motivasyonu artıracaktır. Güvenli verilerin toplanması ve elde edilen verilerin amacına uygun kullanılması iş veriminin artmasına ve hataların azalmasına imkân vererek iş yeri performansının artmasını sağlayacaktır. Ayrıca zaman tasarrufu ve ergonomik avantajlar iş yerinin operasyonel verimliliğini artırırken uzun vadede maliyetleri azaltacaktır. Alanda yazılan bilimsel çalışmalarda yeni nesil kişisel koruyucuların kullanımının iş güvenliği kültürüne, iş performansına, çalışan motivasyonuna olumlu katkı yapacağı ve verimi artıracığı, iş kazası ve meslek hastalıklarının sayısını azaltacağı, güvensiz davranışların belirlenmesine imkân sağlayacağı belirtilmiştir [10, 21, 25, 29, 30].

Maliyet, farkındalık, kurumsal kültür, kişisel koruyucu donanım eğitimlerinin eksik olması, bilinçlendirme çalışmalarının yetersiz olması, çalışanlar tarafından kişisel koruyucu donanımların kullanılmak istenmemesi, teknolojik altyapı eksikliği, çalışanların donanım ve donanımla birlikte entegre edilen ekipmanı kullanıma imkân edilememesi, kültürel zorluklar, yasal düzenlemenin eksik olması, ergonomik tasarımı ve kullanıcı dostu olması konusunda çalışmaların yapılması gerekliliği, veri toplama ve yönetiminde eksiklikler olması, veri gizliliği ve güvenilirlik konusunda endişelerin olması, hukuki ve etik standartların belirlenmemesi, mahremiyet, enerji gibi başlıklar yeni nesil koruyucuların yaygınlaşması ve kullanımında günümüzdeki en büyük engellerdir. Bu

engeller çeşitli yazarlar tarafından da belirtilmiştir [14, 15, 32, 39]. Mevzuat düzenlemeleri, hukuki ve etik standartların belirlenmesi ve uygulanması, Kişisel Verileri Koruma Kanunu (KVKK) uyumlu süreçlerin ve yönetmeliklerin geliştirilmesi, güvenlik, gizlilik ve mahremiyet endişelerinin giderilmesi için bilinçlendirme ve bilgilendirme çalışmalarının yapılması, dijital onay süreçleri ve yasal düzenlemeler ile çalışanların haklarının korunması sağlanırken, süreçlerin daha şeffaf ve verimli hale getirilmesi, yerli üretimin ve rekabetin artırılması, devlet teşviklerinin sağlanmasıyla maliyetlerin azaltılması, teknolojik alt yapının güçlendirilmesiyle veri alma, depolama ve kullanımının kolaylaştırılması, eğitim yatırımlarının desteklenmesi ve çeşitlenmesi yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kullanımının yaygınlaşmasını, işyerlerine kazandırılmasını, çalışanlar tarafından kullanılmasını, kurum kültürü içerisinde kabullenilmesini sağlayacaktır. Bu alanda yapılan çalışmalar, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kullanımı ve yaygınlaşmasındaki engelleri ortadan kaldıracak özellikle yazarlar tarafından vurgulanmıştır [27, 31, 45]. Bu çalışma iş güvenliği süreçlerinde yeni nesil kişisel koruyucu donanımların (KKD) kullanımıyla ilgili avantajlar ve zorlukları kapsamlı bir şekilde incelemektedir. İş yerinin risk profiline ve faaliyet alanına bağlı olarak kişisel koruyucu donanım kullanımında farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Yeni nesil kişisel koruyucu donanımların, veri toplama, anlık uyarılar, ergonomik tasarımlar ve proaktif önlemler gibi önemli avantajlar sunduğu görülmektedir. Ancak, bu teknolojilerin yaygınlaşmasının önünde ekonomik engeller, farkındalık eksiklikleri, eğitim süreçlerinin yetersizliği ve kurumsal kültürün değişime uyum sağlamaması gibi zorluklar bulunmaktadır.

Verimlilik, güvenlik ve veri yönetimi açısından sağladığı avantajlara rağmen, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların benimsenmesinde yüksek maliyetler, teknik arızalar ve yasal düzenleme eksiklikleri önemli sınırlamalar olarak öne çıkmaktadır. Çalışma, gelecekte bu zorlukların ekonomik teşvikler, yerli üretim, farkındalık kampanyaları ve eğitim programları ile aşılabileceğini öngörmektedir. Ayrıca, yasal düzenlemeler ve veri gizliliği gibi unsurların önemine vurgu yapılmakta ve bu donanımların etkili kullanımı için düzenli bakım ve kontrol süreçlerinin kritik olduğu belirtilmektedir.

Çalışma, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların yaygınlaşmasının, sadece iş kazalarını önlemekle kalmayıp aynı zamanda iş yerlerinde verimliliği artırarak operasyonel süreçleri iyileştireceğine dair umut verici bir öngörü sunmaktadır. Ancak, teknolojik altyapının güçlendirilmesi, kültürel adaptasyonun sağlanması ve çalışanların bu ekipmanlara uyumunun artırılması gerekmektedir.

6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu kapsamında: * Toplu korunma tedbirlerine, kişisel

korunma tedbirlerine göre öncelik verilmesi gerekliliği belirtilmiştir. * Kişisel koruyucu donanımlar çalışanlar tarafından doğru kullanılmalı ve korunmalıdır. * İşveren iş yerlerinde kişisel maruziyete ve çalışma ortamına yönelik gerekli kontrol, inceleme ve araştırmalar ile fiziksel, kimyasal ve biyolojik etmenlerle ilgili ölçümleri yapmakla yükümlü kılınmıştır. İlgili yasa incelendiğinde yeni nesil kişisel koruyucu donanımların mevcut yasa ile uyumlu olmadığı belirlenmiştir. Bu kapsamda iş sağlığı ve güvenliği çalışmalarında öncelik toplu korunma yöntemleri (Tehlikenin bertarafı, ikame, mühendislik yöntemleri, idari önlemler) uygulanmaktadır. Toplu koruma sağlanamadığı durumlarda kişiye yönelik korunma tedbirleri uygulanmaktadır. Kişiye yönelik korunma tedbiri olarak kişisel koruyucu donanım kullanılmaktadır. Ancak sağlık ve güvenliğin korunması için işin her aşamasında gerekmesi durumunda toplu korunma tedbirlerine ek olarak kişiye yönelik korunma tedbirleri uygulanması gerektiği vurgulanmalıdır. Kişisel koruyucu donanımların çalışanlar tarafından doğru kullanıldığının, korunduğunun takip edilmesi için işverenin sorumluluğu vurgulanmalı ve takip konusunda KVVK kapsamında yetkiler verilmelidir. Kişisel maruziyet ve ortam ölçümlerinin sürekli ve her ortamda yapılması için yeni nesil kişisel koruyucuların tasarım ve teknolojisinin geliştirilmesi, kullanılması ve takibinin yapılması, kayıt altına alınması konusunda yükümlülükler ve hakların verilmesi mevcut yasaya eklenmelidir [46].

Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği ile Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik kişisel koruyucu donanımların özelliklerini, kullanım alanları, uygunluk testleri, sahip olması gereken işaretlere ilişkin detaylı düzenlemeleri detaylı olarak vermek ve yükümlülükleri belirlemektedir. Ancak, çalışmamızın bulguları, mevcut yönetmeliklerin yeni nesil KKD'lerin teknolojik yeniliklerini (sensör entegrasyonu, dijitalleşme, veri yönetimi gibi) tam olarak kapsamadığını göstermektedir. Örneğin, sensör teknolojileri ve dijital veri yönetimi gibi yenilikler, mevcut yönetmeliklerde açıkça tanımlanmamıştır. Bu durum, yeni nesil KKD'lerin işyerlerinde kullanımı sırasında uygunluk ve denetim süreçlerinde belirsizliklere yol açabilmektedir [47- 48].

Bu çalışmadan hareketle gelecekte; yeni nesil kişisel koruyucu donanımları kullanan çalışanlardan alınan geri bildirimlere dayalı saha çalışmaları yapılması, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların ergonomik ve psikolojik etkileri ölçmeye yönelik çalışmalar yapılması, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların kullanımına dair Türkiye ve diğer ülkelerdeki yasal düzenlemelerin karşılaştırılması, yeni nesil kişisel koruyucu donanımların maliyet- fayda analizleri yapılarak iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesinde ekonomik avantajları hakkında

çalışmalar yapılması önerilmektedir. Ayrıca veri gizliliği, dijital onay süreçleri ve yasal düzenlemeler arasındaki ilişki ve Etik standartlar çerçevesinde iş güvenliği süreçlerinin nasıl iyileştirilebileceği özelinde yasal düzenlemeler, veri gizliliği ve KKD Kullanımı: İş Güvenliği İçin Etik ve Hukuki Yaklaşımlar başlığında çalışmalar yapılması da konunun detaylarının netleşmesi hususunda etkili olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Bhattacharjee, S., Joshi, R., Chughtai, A. A., & Macintyre, C. R. (2019). Graphene Modified Multifunctional Personal Protective Clothing. *Advanced Materials Interfaces*, 6(21). <https://doi.org/10.1002/admi.201900622>
- [2] Satapathy, S., Mishra, D., & Realyvásquez Vargas, A. (2022). Personal Protective Equipment for Farmers (pp. 69–78). https://doi.org/10.1007/978-3-030-88828-2_5
- [3] Del Giudice, A., Dellutri, M., Di Francia, G., Formisano, F., & Loffredo, G. (2023). S. A. L. V. O.: Towards a Smart Personal Protective Equipment (pp. 282–288). https://doi.org/10.1007/978-3-031-08136-1_44
- [4] Saidi, A., Gauvin, C., Ladhari, S., & Nguyen-Tri, P. (2021). Advanced functional materials for intelligent thermoregulation in personal protective equipment. *Polymers*, 13(21), 3711. <https://doi.org/10.3390/polym13213711>
- [5] Tripathi, G. K., Soni, A., Singh, P., Bundela, P., Khiriy, P., Khare, P. S., Dixit, P., & Sundaramurthy, S. (2024). “Advanced Conversion Technologies for PPEs and Their Recent Research Trends” (pp. 53–71). https://doi.org/10.1007/978-981-97-4692-7_3
- [6] Rossin, A. R. S., Spessato, L., Cardoso, F. da S. L., Caetano, J., Caetano, W., Radovanovic, E., & Dragunski, D. C. (2024). Electrospinning in personal protective equipment for healthcare work. *Polymer Bulletin*, 81(3), 1957–1980. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04814-5>
- [7] Shi, J., Li, H., Xu, F., & Tao, X. (2021). Materials in advanced design of personal protective equipment: a review. *Materials Today Advances*, 12, 100171. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100171>
- [8] Reaño, C., Riera, J. V., Romero, V., Morillo, P., & Casas-Yrurzum, S. (2024). A cloud-edge computing architecture for monitoring protective equipment. *Journal of Cloud Computing*, 13(1), 82. <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00649-1>
- [9] Kim, I.-D. (2024). ACS Nano Strengthening Global Ties in South Korea. *ACS Nano*, 18(38), 25907–25909. <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c11864>
- [10] Shen, J., Xiong, X., Li, Y., He, W., Li, P., & Zheng, X. (2021). Detecting safety helmet wearing on construction sites with bounding-box regression and deep transfer learning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(2), 180–196. <https://doi.org/10.1111/mice.12579>
- [11] Yang, X., Yu, Y., Shirowzhan, S., Sepasgozar, S., & Li, H. (2020). Automated PPE-Tool pair check system for construction safety using smart IoT. *Journal of Building Engineering*, 32, 101721. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101721>
- [12] Ding, L., Jiang, W., & Zhou, C. (2022). IoT sensor-based BIM system for smart safety barriers of hazardous energy in petrochemical construction. *Frontiers of Engineering Management*, 9(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s42524-021-0160-6>
- [13] Carmona, A. M., Chaparro, A. I., Velásquez, R., Botero-Valencia, J., Castano-Londono, L., Marquez-Viloria, D., & Mesa, A. M. (2019). Instrumentation and Data Collection Methodology to Enhance Productivity in Construction Sites Using Embedded Systems and IoT Technologies. In *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering* (pp. 637–644). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_76
- [14] Jiang, Y., & He, X. (2020). Overview of Applications of the Sensor Technologies for Construction Machinery. *IEEE Access*, 8, 110324–110335. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3001968>
- [15] Kanan, R., Elhassan, O., & Bensalem, R. (2018). An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies. *Automation in Construction*, 88, 73–86. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.033>
- [16] Prabha, D., B. D., A. D. M., & K. S. (2021). IoT application for Safety and Health Monitoring System for Construction Workers. 2021 5th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 453–457. <https://doi.org/10.1109/ICOEI51242.2021.9452911>
- [17] Xu, Z., & Zheng, N. (2020). Incorporating Virtual Reality Technology in Safety Training Solution for Construction Site of Urban Cities. *Sustainability*, 13(1), 243. <https://doi.org/10.3390/su13010243>
- [18] Yong, C., Xudong, H., Guojun, L., & Ping, W. (2021). Research on safety risk early warning of tunnel construction based on BIM and RFID Technology. *E3S Web of Conferences*, 293, 02048. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129302048>

- [19] Ahn, C. R., Lee, S., Sun, C., Jebelli, H., Yang, K., & Choi, B. (2019). Wearable Sensing Technology Applications in Construction Safety and Health. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001708](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001708)
- [20] E. Angelia, R., S. Pangantihon Jr, R., & F. Villaverde, J. (2021). Wireless Sensor Network for Safety Tracking of Construction Workers through Hard Hat. 2021 7th International Conference on Computing and Artificial Intelligence, 412–417. <https://doi.org/10.1145/3467707.3467769>
- [21] Guo, H., Yu, Y., Xiang, T., Li, H., & Zhang, D. (2017). The availability of wearable-device-based physical data for the measurement of construction workers' psychological status on site: From the perspective of safety management. *Automation in Construction*, 82, 207–217. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.001>
- [22] Jebelli, H., Hwang, S., & Lee, S. (2018). EEG-based workers' stress recognition at construction sites. *Automation in Construction*, 93, 315–324. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.027>
- [23] Goar, V., Sharma, A., Yadav, N. S., Chowdhury, S., & Hu, Y.-C. (2023). IoT-Based Smart Mask Protection against the Waves of COVID-19. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(8), 11153–11164. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04395-7>
- [24] Kim, H., Tae, S., Zheng, P., Kang, G., & Lee, H. (2021). Development of IoT-Based Particulate Matter Monitoring System for Construction Sites. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(21), 11510. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111510>
- [25] Mayton, B., Dublon, G., Palacios, S., & Paradiso, J. A. (2012). TRUSS: Tracking Risk with Ubiquitous Smart Sensing. 2012 IEEE Sensors, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2012.6411393>
- [26] Fugini, M., Conti, G. M., Rizzo, F., Raibulet, C., & Ubezio, L. (2009). Wearable Services in Risk Management. 2009 IEEE/WIC/ACM International Joint Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology, 563–566. <https://doi.org/10.1109/WI-IAT.2009.350>
- [27] Cheng, T., & Teizer, J. (2013). Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications. *Automation in Construction*, 34, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.017>
- [28] Liu, H., Song, J., & Wang, G. (2021). A Scientometric Review of Smart Construction Site in Construction Engineering and Management: Analysis and Visualization. *Sustainability*, 13(16), 8860. <https://doi.org/10.3390/su13168860>
- [29] Marks, E., & Teizer, J. (2012). Proximity Sensing and Warning Technology for Heavy Construction Equipment Operation. *Construction Research Congress* 2012, 981–990. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.099>
- [30] Guo, S. Y., Ding, L. Y., Luo, H. B., & Jiang, X. Y. (2016). A Big-Data-based platform of workers' behavior: Observations from the field. *Accident Analysis & Prevention*, 93, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.09.024>
- [31] Rey-Merchán, M. del C., Gómez-de-Gabriel, J. M., López-Arquillos, A., & Fernández-Madrigal, J. A. (2021). Virtual Fence System Based on IoT Paradigm to Prevent Occupational Accidents in the Construction Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 6839. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136839>
- [32] Huang, L., Fu, Q., He, M., Jiang, D., & Hao, Z. (2021). Detection algorithm of safety helmet wearing based on deep learning. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 33(13). <https://doi.org/10.1002/cpe.6234>
- [33] Abbasianjahromi, H., & Sohrab Ghazvini, E. (2022). Developing a Wearable Device Based on IoT to Monitor the Use of Personal Protective Equipment in Construction Projects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 2561–2573. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00716-6>
- [34] Adjiski, V., Despodov, Z., Mirakovski, D., & Serafimovski, D. (2019). System Architecture To Bring Smart Personal Protective Equipment Wearables And Sensors To Transform Safety At Work In The Underground Mining Industry. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 34(1), 37–44. <https://doi.org/10.17794/rgn.2019.1.4>
- [35] Arcayena, R. D., Ballarta, A. D., Claros, K. N., & Pangantihon, R. S. (2019). Development of Arduino Microcontroller-based Safety Monitoring Prototype in the Hard Hat. *Proceedings of the 2019 6th International Conference on Bioinformatics Research and Applications*, 119–124. <https://doi.org/10.1145/3383783.3383790>
- [36] Balakreshnan, B., Richards, G., Nanda, G., Mao, H., Athinarayanan, R., & Zaccaria, J. (2020). PPE Compliance Detection using Artificial Intelligence in Learning Factories. *Procedia Manufacturing*, 45, 277–282. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.017>
- [37] Harito, C., Utari, L., Putra, B. R., Yulianto, B., Purwanto, S., Zaidi, S. Z. J., Bavykin, D. V., Marken, F., & Walsh, F. C. (2020). Review—The Development of Wearable Polymer-Based Sensors: Perspectives. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(3), 037566. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab697c>

- [38] Ji, X., Gong, F., Yuan, X., & Wang, N. (2023). A high-performance framework for personal protective equipment detection on the offshore drilling platform. *Complex & Intelligent Systems*, 9(5), 5637–5652. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01028-0>
- [39] Li, Y., Wei, H., Han, Z., Huang, J., & Wang, W. (2020). Deep Learning-Based Safety Helmet Detection in Engineering Management Based on Convolutional Neural Networks. *Advances in Civil Engineering*, 2020(1). <https://doi.org/10.1155/2020/9703560>
- [40] Slade Shantz, J. A., & Veillette, C. J. H. (2014). The Application of Wearable Technology in Surgery: Ensuring the Positive Impact of the Wearable Revolution on Surgical Patients. *Frontiers in Surgery*, 1. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2014.00039>
- [41] Ghosh, S., Dave, V., Sharma, P., Patel, A., & Kuila, A. (2023). Protective face mask: an effective weapon against SARS-CoV-2 with controlled environmental pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(29), 41656–41682. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30460-5>
- [42] Rao, P. M., & Deebak, B. D. (2023). Security and privacy issues in smart cities/industries: technologies, applications, and challenges. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(8), 10517–10553. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-03707-1>
- [43] Sung, C.-H., & Lu, M.-C. (2023). Protection of personal privacy under the development of the Internet of Things. *Wireless Networks*. <https://doi.org/10.1007/s11276-023-03569-1>
- [44] Han, T.-S., Kim, D., Kwon, O.-Y., & Choa, S.-H. (2016). Study of Standardization and Test Certification for Wearable Smart Devices. *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 23(4), 11–18. <https://doi.org/10.6117/kmeps.2016.23.4.011>
- [45] Xu, Q., Chong, H.-Y., & Liao, P.-C. (2019). Collaborative information integration for construction safety monitoring. *Automation in Construction*, 102, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.004>
- [46] Kanun, 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 30.06.2012 tarihli ve 28339 sayılı Resmî Gazete
- [47] Yönetmelik, Kişisel Koruyucu Donanım Yönetmeliği, 01.05.2019 tarihli ve 30761 sayılı Resmî Gazete
- [48] Yönetmelik, Kişisel Koruyucu Donanımların İşyerlerinde Kullanılması Hakkında Yönetmelik, 02.07.2013 tarihli ve 28695 sayılı Resmî Gazete

Elektrikli Araç Şarj İstasyonları İçin Yüksek Verimli AA-DA Dönüştürücü Topolojileri ve Yapay Sinir Ağı Tabanlı Harmonik Bozunum Tahmini

High-Efficiency AC-DC Converter Topologies for Electric Vehicle Charging Stations and Artificial Neural Network-Based Harmonic Distortion Estimation

Murat ÜNLÜ¹, Ahmet BÜYÜKDAĞ¹

¹Kocaeli Üniversitesi (KOÜ), Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

Öz

Elektrikli araçlardaki yüksek şarj süreleri ve menzil sorunları, bu araçların yaygınlaşmasını engelleyen önemli faktörler arasındadır. Şehirlerde ve yollarda şarj istasyonlarının yaygınlaşması, özellikle uzun yolculuklarda yaşanan menzil sorunlarını azaltmada etkili olacaktır. Bununla birlikte, elektrikli araçların cazibesini artırmak amacıyla şarj sürelerinin kısaltılması ve enerji verimliliğinin yükseltilmesi gerekmektedir. Bu doğrultuda, hızlı şarj cihazlarının geliştirilmesi hem araçların daha kısa sürede şarj edilmesini sağlamakta hem de şarj istasyonlarının etkinliğini arttırmaktadır. Literatürde, bu hedeflere ulaşmak için verimliliği arttırmayı amaçlayan farklı dönüştürücü topolojilerine dayalı çeşitli hızlı şarj istasyonu tasarımları incelenmiştir. Elektrikli araçların verimli kullanımı sağlamak için kritik konulardan biri de şarj işlemlerinde harmonik bozulmaların ve reaktif güç artışının kontrol altına alınmasıdır. Şebekeden sinüsoidal olmayan akımlar çekilmesi, harmonik bozulmalara ve reaktif gücün artmasına neden olarak güç kalitesini düşürmekte, enerji kayıplarına ve cihazların verimsiz çalışmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, lineer olmayan yüklerin yönetimi ve etkilerinin sınırlandırılması, PFC (Power Factor Correction - Güç Faktörü Düzeltme) açısından büyük önem taşımaktadır. Bu makalede, elektrikli araç şarj istasyonlarında kullanılan AA-DA dönüştürücü topolojileri incelenmiş; geleneksel AA-DA dönüştürücüler ile PFC içeren topolojiler avantajları ve dezavantajları üzerinden karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, Totem-Kutuplu PFC Yükseltici topolojisinde toplam harmonik bozunum (THD) değerini yapay sinir ağı (YSA) kullanarak tahmin etmektir. Geliştirilen YSA tabanlı model, PFC topolojilerinde verimliliği artırmanın bir adımı olarak, THD değerini doğru bir şekilde tahmin edebilmekte ve böylece güç kalitesinin iyileştirilmesine katkı sunmaktadır. Modelin performansı MATLAB/Simulink ortamında test edilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma, yapay sinir ağı tabanlı modelleme yaklaşımıyla güç dönüştürücülerde verimliliği artırma amacına yönelik bir katkı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli araç şarj istasyonları, Güç faktörü düzeltme PFC Topolojileri, Toplam Harmonik Bozunum (THB), AA-DA Dönüştürücüler, Yapay Sinir Ağı (YSA)

Abstract

The high charging times and range issues in electric vehicles are among the significant factors hindering their widespread adoption. The proliferation of charging stations in cities and along roads will effectively mitigate range issues, especially on long journeys. However, to increase the appeal of electric vehicles, it is necessary to shorten charging times and enhance energy efficiency. In this direction, the development of fast chargers not only enables quicker vehicle charging but also improves the efficiency of charging stations. In the literature, various fast charging station designs based on converter topologies aiming to improve efficiency have been examined to achieve these goals. One of the critical aspects for the efficient use of electric vehicles is controlling harmonic distortions and reactive power increases during charging processes. Drawing non-sinusoidal currents from the grid causes harmonic distortions and an increase in reactive power, thereby reducing power quality, leading to energy losses, and causing devices to operate inefficiently. Therefore, managing non-linear loads and limiting their effects is crucial in terms of Power Factor Correction (PFC). This paper examines AC-DC converter topologies used in electric vehicle charging stations, comparing traditional AC-DC converters with topologies that include PFC based on their advantages and disadvantages. The main goal of the study is to predict the Total Harmonic Distortion (THD) value using an Artificial Neural Network (ANN) in a Totem-Pole PFC Boost topology. The developed ANN-based model can accurately predict the THD value, which is a step toward improving efficiency in PFC topologies, thereby contributing to the improvement of power quality. The model's performance was tested in the MATLAB/Simulink environment, yielding successful results. This study presents a contribution toward the goal of enhancing efficiency in power converters through an ANN-based modeling approach.

Keywords: Electric Vehicle Charging Stations, Power Factor Correction PFC Topologies, Total Harmonic Distortion (THD), AC-DC Converters, Artificial Neural Network (ANN)

I. GİRİŞ

Teknolojinin hızla ilerlemesi, enerji ihtiyacımızı her geçen gün artırmaktadır. Fosil yakıtların azalması ve enerji kaynaklarının sınırlı hale gelmesi, yenilenebilir enerji kaynaklarının önemini vurgularken, mevcut enerjinin daha verimli kullanılmasını da zorunlu kılmaktadır. Bunun yanı sıra, elektrik enerjisine olan talebin sürekli artması, elektrik şebekeleri üzerindeki yükü artırmakta ve bu şebekelerin karmaşıklığını derinleştirmektedir. Bu durum, enerji sistemlerinin daha verimli ve kararlı hale getirilmesi için yenilikçi çözümlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Şebekeye bağlı lineer olmayan yüklerin etkisi de bu süreçte önemli bir faktör haline gelmiştir. Güç kaynakları, elektronik cihazlar ve endüksiyon motorları gibi yükler, şebekeden sinüsoidal olmayan akımlar çekerek harmonik bozulmalara ve reaktif güç artışına neden olmaktadır. Bu bozulmalar, güç kalitesini olumsuz etkileyerek enerji kayıplarına ve cihazların verimsiz çalışmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, lineer olmayan yüklerin yönetimi ve etkilerinin sınırlandırılması, PFC açısından kritik bir önem taşımaktadır [1].

Günümüzde en yaygın kullanılan AA-DA dönüştürücü topolojilerinden biri, basit bir köprü diyot ve DA-DA dönüştürücüyü içeren Yükseltici anahtarlama modlu doğrultuculardır. Bu topoloji, yapısal basitliği ve yüksek güç faktörü avantajları ile öne çıkmaktadır. Ancak, köprü diyotların yüksek iletim direnci, özellikle yüksek güç seviyelerinde devrenin verimliliğini önemli ölçüde düşürmektedir [2].

Elektrik enerji sistemlerinde güç kalitesini olumsuz etkileyen faktörlerden biri de harmoniklerdir [3,4]. Lineer olmayan yüklerden kaynaklanan harmonikler, sistemdeki akım ve gerilim dalga formlarının temel frekanstan sapmasına neden olarak cihazların düzgün çalışmasını engellemektedir. Harmoniklerin önlenmemesi, sistemde rezonansa yol açarak aşırı gerilim ve akımlara neden olur, bu da sistem elemanlarının zarar görmesine yol açmaktadır [5,6]. Bu nedenle, sistemlerin güvenilir bir şekilde çalışması için güç sistemi harmoniğini hızlı ve doğru bir şekilde tahmin etmek büyük önem taşımaktadır [7].

Son yıllarda, güç dönüştürücülerinin analizine yönelik çeşitli modelleme teknikleri geliştirilmiştir. PWM anahtar modeli, transformator modeli ve durum-uzayı ortalama modeli gibi yaklaşımlar dönüştürücüler için büyük önem taşımaktadır [8,9]. Bu modelleme teknikleri, dönüştürücünün kayıplarını, transfer fonksiyonunu ve diğer önemli parametrelerini, devre fiziksel olarak inşa edilmeden önce tahmin etmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, bu yöntemler, birçok güç elektroniği simülasyon aracının temelini oluşturmaktadır [10]. Bunun yanında, model tabanlı ve öngörücü kontrol stratejilerine yönelik ilgi de artmaktadır [11]. Bu gelişmeler, veri toplama ve işleme

tekniklerindeki ilerlemelerle birleşerek güç elektroniği alanında önemli fırsatlar yaratmıştır. Bu da sistem tasarımına daha bütüncül bir yaklaşım gerektiren modelleme ve analiz tekniklerinde ek gelişmeleri teşvik etmektedir.

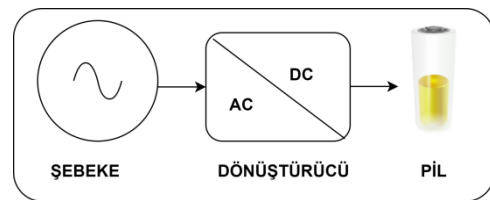
Makine öğrenmesi kullanarak veri odaklı modelleme, sistem davranışını geniş bir çalışma koşulları yelpazesi altında modelleme ve tahmin etmek için farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, görüntü sınıflandırma, konuşma tanıma, güç sistemleri, dalga formu büyüklüğü tahmini ve kontrol sistemleri gibi uygulamalarda popülerlik kazanmıştır [12-15]. YSA'lar, güç dönüştürücülerinin hem geçici hem de kararlı durum özelliklerini yüksek doğrulukla modelleyebilmekte olup, aynı zamanda düşük maliyetli yazılımlar aracılığıyla da uygulanabilmektedir.

Bu tür çalışmalar sayesinde, makine öğrenmesi modern güç elektroniği endüstrisinde yaygın kabul görmeye başlamıştır.

Bu çalışmada, geleneksel AA-DA dönüştürücüler ile güç faktörü düzeltilmesi (PFC) içeren AA-DA topolojileri; devre şemaları, çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları gibi çeşitli parametreler açısından incelenmiştir. Ardından, Totem-Kutuplu PFC Yükseltici devre için toplam harmonik bozunum değerini tahmin etmeye yönelik bir YSA modeli, Levenberg-Marquardt algoritması ile eğitilerek geliştirilmiştir. Model, test aşamasında değerlendirilmiş ve sonuçlar gözlemlenmiştir.

II. MATERYAL VE METOD

Elektrik araç bataryaları genellikle 400VDC gerilim ile şarj edilirler. Bu durumda, şebekeden beslenen piller için AC şebekenin DC'ye dönüştürülmesi ve 230VAA olan şebeke geriliminin 400VDC'ye yükseltilmesi gerekir. Bu özellikte çeşitli şarj devreleri kullanılmaktadır [16]. Bu işlem Şekil 1'de de görüldüğü gibi çeşitli dönüştürücüler yardımıyla yapılmaktadır.



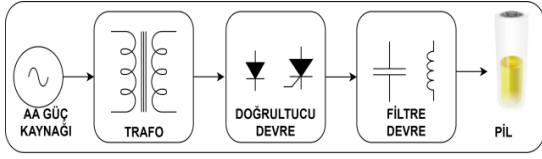
Şekil 1. Şebeke ile şarj edilen pil şarj Devre şeması.

2.1. AA-DA Dönüştürücü Topolojileri

2.1.1. Geleneksel AA-DA dönüştürücüler

Geleneksel AA-DA dönüştürücü topolojisi genel olarak Şekil 2'de görüldüğü yapıya sahiptir. Bu tip dönüştürücülerde giriş gerilimi önce bir transformator yardımıyla yükseltilir, daha sonra kontrollü veya

kontROLSÜZ doğrultucular kullanılarak AA gerilim doğrultulur. Ardından filtre devresi kullanılarak daha düzgün bir DC gerilimi elde edilmeye çalışılır.

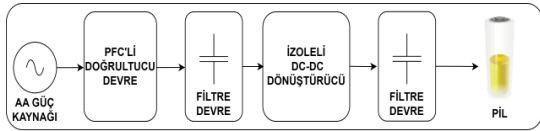


Şekil 2. Geleneksel AA-DA dönüştürücü devre şeması

Geleneksel AA-DA Dönüştürücü devreleri basit yapıları sebebiyle yaygın kullanıma sahiptir. Ancak filtre devresi ve trafo, devrenin hacimsel olarak büyümesine sebep olur. Ayrıca diyotların yüksek iletim dirençleri; iletim kayıpları ve ısı problemlere sebep olmaktadır. Geleneksel dönüştürücüler, giriş kaynağının akımını ciddi şekilde bozar ve kaynaktan harmoniklere neden olarak düşük bir güç faktörüne yol açar [17].

2.1.2. PFC'li AA-DA dönüştürücüler

PFC'li dönüştürücü topolojileri transformatör kullanmadan gerilimi artırır. Bu da devrenin boyutunu büyük oranda azaltır. Aynı zamanda Güç Faktörünü düzenleyerek kayıpları ve harmonikleri minimuma indirir. Şekil 3'te PFC'li AA-DA dönüştürücü topolojisinin genel devre şeması görülmektedir.

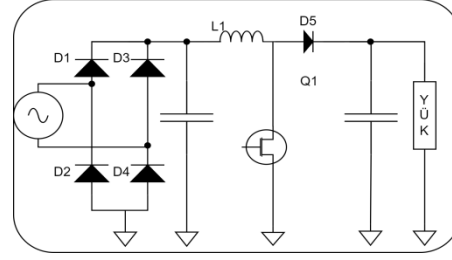


Şekil 3. PFC'li AA-DA dönüştürücü devre şeması

Güç faktörü düzeltmesi için en yaygın kullanılan topoloji, Köprülü PFC Yükseltici topolojisidir. Ancak geniş bant aralıklı yeni nesil yarı iletkenlerin ortaya çıkışı, Totem Kutuplu PFC Yükseltici gibi köprüsüz topolojilerin uygulanmasını mümkün kılmıştır.

2.1.2.1. Geleneksel köprülü PFC yükseltici AA-DA dönüştürücüler

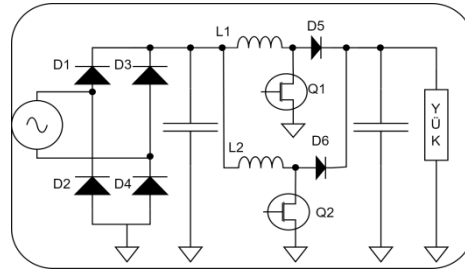
Geleneksel Köprülü PFC Yükseltici devreleri AA-DA dönüştürücüler arasında en çok kullanılan topolojidir. Topolojiye ait devre şeması Şekil 4'de yer gösterilmektedir. Bu devrede AA gerilim önce köprü diyotlar ile doğrultulur. Daha sonradan Yükseltici devresi ile daha yüksek bir gerilime çıkartılır.



Şekil 4. Geleneksel köprülü PFC yükseltici devre şeması

Tek bir yükseltici dönüştürücü kullanılarak da güç faktörü düzeltmesi sağlanabilir, ancak bu durumda yüksek güçlü ve büyük bileşenlere ihtiyaç duyulabilir. Bu, pratik olmayabilir ve maliyeti artırabilir.

Daha yaygın olarak tercih edilen yöntem ise Şekil 5'de gösterildiği gibi iki veya daha fazla dönüştürücünün, birbirleriyle bir faz kayması olacak şekilde paralel olarak bağlanmasıdır. Bu durumda, dönüştürücüler birbirlerini tamamlayarak çalışırlar. Bu durum "faz kaydırma (interleaved)" olarak adlandırılır.

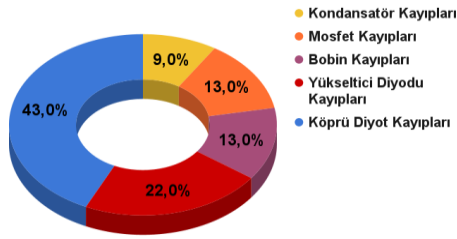


Şekil 5. Faz kaydırmalı PFC yükseltici devre şeması

Faz kaydırma, birincil dönüştürücünün çalışma döngüsünün, ikincil dönüştürücünün çalışma döngüsünün ortasına gelecek şekilde zamanlamasını ifade eder. Bu, her iki dönüştürücünün de giriş akımını doğru şekilde şekillendirmesine ve böylece güç faktörünü düzeltilmesine yardımcı olur.

Faz kaydırma tek bir dönüştürücüye göre daha verimli bir şekilde çalışabilir ve daha küçük bileşenler kullanılmasını sağlar. Ayrıca, giriş akımındaki dalgalanmaları azaltarak elektrik şebekesine daha az yük bindirir. Bu, enerji verimliliğini artırır ve elektrik sisteminin daha istikrarlı bir şekilde çalışmasını sağlar.

Geleneksel Köprülü PFC Yükseltici devresi, MOSFET'lerin yüksek frekanslarda anahtarlama nedeniyle önemli anahtarlama kayıplarına, köprü diyotlar ile yüksek iletim kayıplarına ve ayrıca yükseltici diyotun da iletim ve ters toparlanma kayıplarına sahiptir. Bu kayıplara ait grafik Şekil 6'da yer almaktadır [17]. Bu nedenle bu topoloji 3,5 kW'tan küçük uygulamalar için kullanılmalıdır [18].



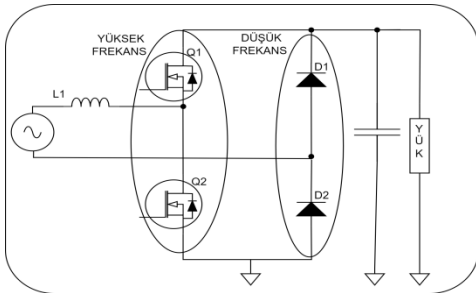
Şekil 6. Geleneksel köprülü PFC yükseltici kayıpları

2.1.2.2. Totem-kutup PFC yükseltici dönüştürücüler

Totem Kutuplu PFC Yükseltici devresi, Şekil 7’de gösterildiği gibi yarı iletkenlerin iki farklı kolda kullanıldığı yapıya sahiptir.

D1 ve D2 diyotlarını içeren düşük frekans kolu şebeke frekansında (50-60 Hz) çalışmaktadır. Bu kol gelen gerilimi doğrultmak ile görevlidir.

Q1 ve Q2 anahtarlarını içeren kol ise yüksek frekanslarda çalışmaktadır. Bu kol ise gelen gerilimi yükseltmek ile görevlidir. Ayrıca kolda bulunan yarıiletkenlerin doluluk oranı üzerinden Güç Faktörü düzeltilir.



Şekil 7. Diyotlu totem kutuplu PFC yükseltici devre şeması

Yüksek anahtarlama frekanslarında yarı iletkenlerin anahtarlama kayıpları artmaktadır. Bu durum yarıiletken üzerindeki elektriksel ve termal kayıpları da artırmaktadır. Yüksek frekans kolunda yüksek frekanslarda dahi düşük anahtarlama kayıpları ve iletim dirençlerine sahip yeni nesil yarı iletkenler kullanılarak bu devrenin kayıpları minimize edilebilmektedir.

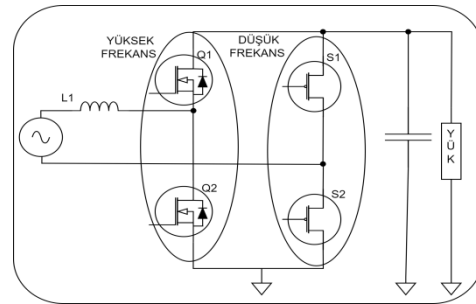
Bu topoloji, diyotların ters toparlanma süresinin ve harmonik bozulmaların azaltılması gibi avantajlara sahiptir.

Ayrıca devrede köprü diyotların olmaması sebebiyle düşük iletim kayıpları, trafo olmaması sebebiyle minimum boyut gibi avantajlara da sahiptir.

Bu topoloji, köprü aralıklı PFC’ler ile kıyaslandığı zaman verim, boyut ve maliyet açısından avantajlıdır [19,20].

Şekil 8’de yer alan diyotlarda oluşan fazla gerilim düşümünü engellemek amacıyla, diyotlar yerine iletim direnci çok daha düşük olan MOSFET’leri kullanılması önerilmektedir. Bu sayede daha yüksek verimle çalışacak Totem-Kutuplu PFC Yükseltici devresine yönelik çalışmalar da literatürde yer almaktadır.

Ancak bu devre daha fazla anahtar sürücü devresine ihtiyaç duymaktadır. Bu da devrenin dezavantajlarından [20].



Şekil 8. Totem kutuplu MOSFET’li PFC yükseltici devre şeması

2.2. Makine Öğrenimi Tabanlı Model Geliştirme

Bu çalışmada önerilen YSA tabanlı modelleme tekniğinin temel amacı, güç dönüştürücü devresinin toplam harmonik bozunum (THD) değerini tahmin etmektir. Model, THD’yi etkileyen ana parametreler olan bobin değeri ve anahtarlama frekansını girdi olarak almaktadır. Bu parametreler doğrultusunda, modelin toplam harmonik bozunum seviyesini doğru bir şekilde tahmin etmesi ve sunması beklenmektedir.

Model geliştirme süreci dört aşamadan meydana gelmektedir:

2.2.1. Veri toplama

Geliştirilen modelin performansı, kullanılan veri setinin kalitesi ile doğrudan ilişkilidir; bu nedenle veri toplama aşaması son derece önemlidir. Veri, donanım prototipinden veya bu donanımın doğru bir simülasyon modelinden elde edilir. Daha fazla veri kullanımı, daha hassas bir modele ulaşmayı sağlamaktadır; ancak bu durum hesaplama süreçlerini daha zorlayıcı hale getirmektedir.

Bu çalışmada, metodolojiye odaklanmak amacıyla veriler MATLAB simülasyonları üzerinden elde edilmiştir. Toplanan veri seti, endüktans ve anahtarlama frekansı parametre değerlerini ve bu parametrelere karşılık gelen toplam harmonik bozunum yanıtlarını içermektedir. Veri toplama aşaması, devrenin kararlı hale gelmesiyle başlatılmıştır.

Tablo 1, veri setinden alınan örnek verileri göstermektedir. Bu tabloda, aynı endüktans değeri için üç farklı anahtarlama frekansında elde edilen THD değerleri ile aynı anahtarlama frekansında üç farklı endüktans değerinde elde edilen THD değerleri sunulmuştur. Bu sayede, anahtarlama frekansı ve endüktans değerlerinin THD üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Veri seti hazırlanırken anahtarlama frekans aralığının her 10 kHz değeri için, bobin değeri için ise her 25 uH değeri için ölçümler yapılmıştır.

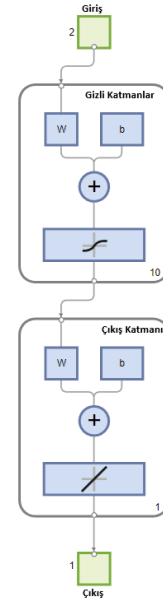
Tablo 1. Veri setinde yer alan örnek veriler

Endüktans (uH)	Anahtarlama Frekansı (kHz)	THD (%)
250	10	3.133
250	50	3.134
250	100	3.279
100	50	7.427
275	50	2.879
450	50	1,93

2.2.2. YSA eğitim algoritması

Levenberg-Marquardt (LM) algoritması, çok katmanlı yapay sinir ağlarında eğitim sürecini hızlandırmak ve doğruluğu artırmak amacıyla geliştirilmiş güçlü bir optimizasyon yöntemidir. Bu algoritma, Newton-Raphson ve gradyan inişi yöntemlerinin avantajlarını birleştirerek özellikle hata fonksiyonunu en aza indirmek için kullanılır. Yapay sinir ağlarının çok katmanlı yapısında hızlı ve güvenilir bir yakınsama sağladığından dolayı LM algoritması tercih edilmektedir.

LM algoritmasının işleyişinde, her iterasyonda ağın hatasını hesaplamak ve her katmandaki ağırlıkları güncellemek önemli bir rol oynar. Bu süreçte sinir ağı genellikle Şekil 9'da da görüldüğü gibi üç temel katmandan oluşur: giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanı.



Şekil 9. LM algoritması katman gösterimi

İlk olarak, giriş katmanı, verilerin sinir ağına girdiği ilk adımdır. Giriş katmanı, modele öğrenilmesi gereken özellikleri aktarır, ancak ağırlık güncellemesi bu katmanda gerçekleşmez. Bu katmandaki nöronlar, veriyi sonraki katmanlara taşımak için bir köprü görevi görür. Dolayısıyla, giriş katmanında yalnızca verinin ağ boyunca yayılması sağlanır.

Sonraki adımda, gizli katmanlar, modelin öğrenme sürecinin gerçekleştiği ana katmanlardır. LM algoritması, her bir gizli katmandaki nöronlarda bulunan ağırlıkları ve kaymaları (biasları), modelin toplam hatasını en aza indirecek şekilde iteratif olarak günceller. Bu süreçte adaptif lambda değeri devreye girer. Lambda, algoritmanın gradyan inişi veya Newton-Raphson yöntemine göre daha güvenli veya daha hızlı bir adım atmasını sağlar. Yüksek bir lambda değeri olduğunda gradyan inişi yaklaşımı kullanılarak güvenli adımlar atılır; düşük lambda değeri ise daha hızlı Newton-Raphson yöntemine ağırlık verir. Gizli katmanlarda yapılan güncellemeler, hata fonksiyonunun türevlerine dayalı Jacobian matrisi kullanılarak yapılır ve bu, sinir ağına her katmanında hata oranını hızla düşürür.

Son olarak, çıkış katmanı, modelin tahmin ettiği sonucun hesaplandığı yerdir. Çıkış katmanında, modelin çıktısı ile gerçek değer arasındaki fark (örneğin Mean Squared Error - MSE) hesaplanır. LM algoritması bu hatayı en aza indirmek için her bir katmandaki ağırlık ve kayma değerlerini günceller. Çıkış katmanında hesaplanan hata, modelin genel doğruluğunu artırmak için geri yayılım yoluyla ağı tüm katmanlarında güncellemeler yapılmasını sağlar.

LM algoritmasını bu projede seçmemizin en önemli nedeni, çok katmanlı yapılarda modelin hata fonksiyonunu hızlı ve güvenilir bir şekilde minimize edebilmesidir. Özellikle karmaşık ve çok sayıda gizli katmanı olan sinir ağlarında, gradyan inişi yönteminin yavaş kalabileceği durumlarda LM algoritması adaptif yapısı sayesinde hızlı bir çözüm sunar. Adaptif lambda değeri ile gradyan inişi ve Newton yöntemleri arasında geçiş yaparak her bir katmanda hata oranını azaltır ve modelin öğrenme sürecini hızlandırır. [22,23]

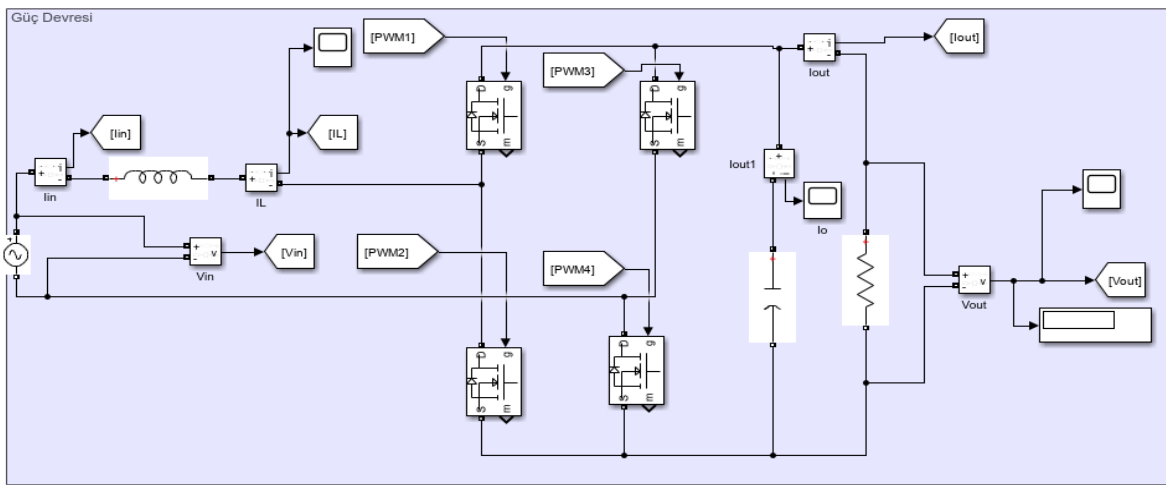
2.2.3. Model doğrulama

Genellikle, veri satırlarının %70'i eğitim için, %30'u ise modelin test edilmesi için kullanılmaktadır. Bu oran ihtiyaca göre değiştirilebilir. Doğrulama süreci, verilerin örneklemeyle gerçekleştirilir. Eğer model bu

aşamada iyi sonuçlar vermezse, yeniden eğitilmesi gerekir. Model performansı, hata histogramları ve regresyon grafikleri kullanılarak değerlendirilebilir.

2.2.4. Model uygulaması

Model, test verileri ile tatmin edici sonuçlar verdiğinde, yeni test giriş değerleri kullanılarak doğrulanması gerçekleştirilmelidir. MATLAB'ın YSA araç kutusu kullanılarak model, bir kod veya Simulink bloğu olarak dışa aktarılabilir. Model, belirli bir giriş seti için bir çıktı üretecek ve bu çıktı, donanım veya simülasyon modeli ile karşılaştırılarak doğruluğu test edilecektir. Bu aşama, modelleme sürecini tamamlar.



Şekil 10. Totem kutuplu MOSFET'li PFC yükseltici devresinin Matlab Simulink modeli

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Veri toplama aşamasında kullanılan Totem-Kutuplu PFC Yükseltici devresinin MATLAB Simulink modeli Şekil 10'da gösterilmiştir. Eğitim esnasında kullanılan parametreler ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Simülasyonda kullanılan parametre değerleri

Parametre	Değer
Giriş Gerilimi (VAA)	220
Çıkış Gerilimi (VDA)	400
Anahtarlama Frekansı (kHz)	10-100
Bobin Değeri (uH)	100-450
Kapasite Değeri (uF)	1963
Yük (Ω)	43
Zaman (saniye)	3

Veriler toplandıktan sonra model eğitimi gerçekleştirilmiştir. Eğitim sonucunda elde edilen modelin doğruluğunu kontrol edilmesini sağlayan grafikler aşağıda yer almaktadır.

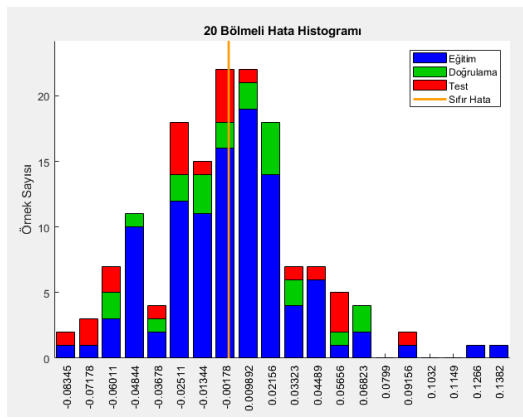
Şekil 11'de gösterilen hata histogramı, modelin eğitim, doğrulama ve test aşamalarında elde edilen hata değerlerinin dağılımını görselleştirmektedir. Grafik, hedef değerler ile modelin tahmin ettiği değerler arasındaki farkları (hata değerlerini) farklı renklerle temsil etmektedir.

Yatay eksen, hata miktarlarını (hedef - çıktı) gösterirken; dikey eksen, her bir hata aralığında kaç örnek bulunduğunu ifade etmektedir. Modelin eğitim aşamasında oluşan hata değerleri mavi, doğrulama aşamasındaki hata değerleri yeşil, test aşamasındaki hata değerleri ise kırmızı renkle gösterilmiştir. Grafikteki turuncu çizgi ise sıfır hatayı temsil etmektedir ve modelin ideal durumda hedef değerle tam eşleşen tahminler yapması durumunu ifade etmektedir.

Hata dağılımının merkezde yoğunlaşmış olması, modelin büyük bir kısmının hedef değerlere oldukça yakın tahminler yaptığını göstermektedir. Bu durum,

modelin eğitim verilerinde başarılı bir öğrenme gerçekleştirdiğini ve genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu işaret etmektedir. Hata değerleri simetrik bir dağılım göstermekte olup, modelin hedef değerler etrafında dengeli bir tahmin performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Negatif ve pozitif hata değerlerinin dengeli olması, modelin herhangi bir yönde aşırı sapma göstermediğini belirtmektedir.

Sonuç olarak, bu hata histogramı, modelin genellikle hedef değerlere yakın tahminler yaptığını ve doğrulama ile test aşamalarında da genelleme yeteneğini koruduğunu göstermektedir. Bu analiz, modelin tahmin doğruluğunu ve güvenilirliğini vurgulamakta, gelecekte yapılacak iyileştirme çalışmaları için önemli bir temel oluşturmaktadır.



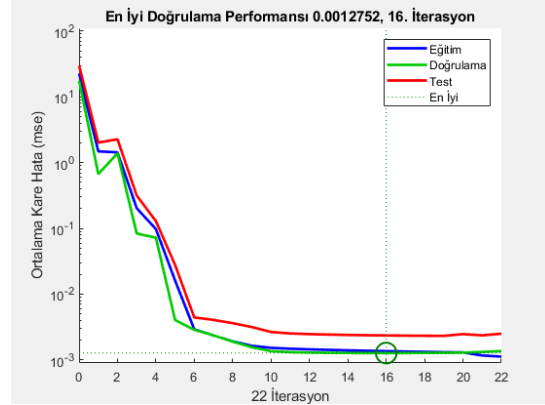
Şekil 11. Hata histogram grafiği

Şekil 12'de sunulan grafik, sinir ağı modelinin eğitim sürecinde ortalama kare hatanın (Mean Squared Error, MSE) iterasyonlar boyunca nasıl azaldığını göstermektedir. Modelin hata oranlarının dönemler (iterasyonlar) boyunca değişimini gösteren grafik, modelin öğrenme süreci ve genelleme yeteneği hakkında önemli bilgiler sunmaktadır.

Grafikte, yatay eksen dönemleri temsil ederken dikey eksen, logaritmik bir ölçekle ifade edilen ortalama kare hata (MSE) değerlerini göstermektedir. Başlangıçta yüksek hata oranıyla başlayan eğitim sürecinde, modelin eğitim verilerindeki hata oranı hızlı bir düşüş göstermektedir. Bu düşüş, modelin her bir iterasyon ile hedef değerlerine daha fazla uyum sağladığını göstermektedir.

Doğrulama setinde ise 16. dönemde en düşük hata değeri olan 0.0012752 MSE elde edilmiştir. Bu noktada model, doğrulama setinde en iyi performansını sergilemiştir. Bu aşamadan sonra, eğitim ve doğrulama hataları yatay bir seyir izleyerek stabil hale gelmiştir. Bu durum, modelin öğrenme sürecini tamamladığını ve daha fazla eğitim ile hata oranında büyük bir iyileşme sağlanamayacağını işaret etmektedir. Ayrıca, doğrulama ve test setindeki hata oranlarının eğitim setine yakın değerlerde stabil olması, modelin

genelleme yeteneğinin yüksek olduğunu ve aşırı öğrenme (overfitting) yapmadığını göstermektedir. Bu analiz, modelin eğitim süreci boyunca hedef değerlere uyum sağlama ve hata oranını azaltma yeteneğini ortaya koymakta ve modelin genelleme performansının yüksek olduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 12. Performans grafiği

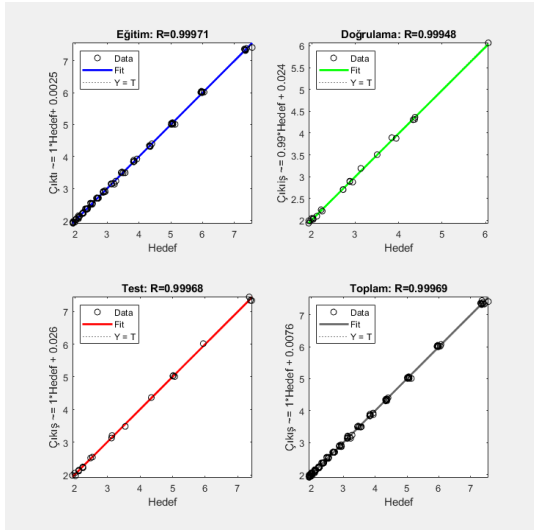
Şekil 13'de sunulan dört alt grafikteki her bir alt bölüm, farklı veri setleri üzerinde modelin hedef değerler ile tahmin ettiği değerler arasındaki uyumu göstermektedir. Bu grafikler, modelin genelleme yeteneğini ve doğruluğunu değerlendirmek açısından kritik öneme sahiptir.

Yatay eksen hedef değerleri, dikey eksen ise modelin tahmin ettiği çıktı değerlerini göstermektedir. Grafikteki kesikli doğrusal çizgi, ideal durumda hedef ve çıktı değerlerinin eşleştiği durumu ifade etmektedir. Her bir grafik üzerinde yer alan korelasyon katsayısı (R), modelin tahmin performansını sayısal olarak değerlendirmemize olanak tanır.

Eğitim setinde elde edilen R değeri 0.99971 olup, modelin hedef değerlere oldukça yakın bir doğrulukla tahmin yaptığını göstermektedir. Doğrulama setindeki R değeri ise 0.99948 olarak belirlenmiştir; bu değer, modelin eğitim sürecinde aşırı öğrenme yapmadığını ve yeni verilere genellelebildiğini gösterir. Test setinde elde edilen R değeri de 0.99968 olup, modelin daha önce görmediği verilere karşı da yüksek bir doğruluk sağladığını kanıtlamaktadır.

Toplam veri seti üzerinde hesaplanan R değeri 0.99969 olarak bulunmuştur. Bu yüksek korelasyon değeri, modelin tüm veri setlerinde güvenilir tahminler yaptığını ve hedef değerlere yakın sonuçlar verdiğini doğrulamaktadır. Tüm bu sonuçlar, modelin yüksek bir genelleme yeteneğine sahip olduğunu ve yeni veriler üzerinde başarılı bir performans sergileyebileceğini göstermektedir.

Bu analiz, modelin performansını daha detaylı bir şekilde ortaya koymakta ve doğruluk ile genelleme yeteneği açısından güvenilir bir yapay sinir ağı geliştirdiğimizi desteklemektedir.



Şekil 13. Regresyon grafiği

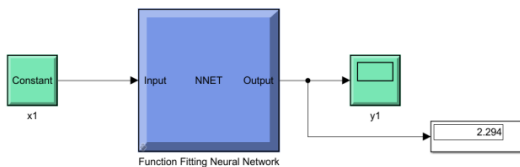
Bu sonuçlar, modelin hem eğitim hem de test aşamalarında tatmin edici performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Eğitilen model, Şekil 14'te gösterildiği gibi bir Simulink bloğu olarak elde edilmiştir. Eğitim aşaması tamamlandıktan sonraki adım, eğitilen modelin yeni parametre değerleri ile test edilerek doğruluğunun değerlendirilmesidir.

Test aşaması için parametreler, anahtarlama frekansı 85 kHz ve bobin değeri 365 μ H olarak belirlenmiştir. Bu parametreler, modelin eğitiminde kullanılan veri seti dışında seçilmiştir. Böylece, modelin farklı veri kümelerine karşı nasıl bir performans sergilediği gözlemlenmek istenmiştir.

Girilen parametre değerlerine ait Simülasyon sonucunda elde edilen toplam harmonik bozunum değeri Şekil 14'de görüldüğü gibi %2.307 olarak ölçülmüştür. Şekil 15'de görüldüğü üzere eğitilen modelin cevabı ise %2.294 olmuştur.

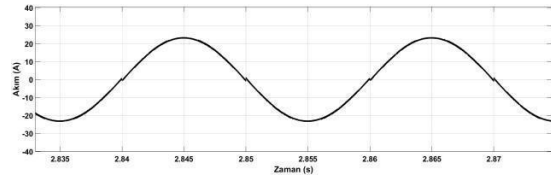


Şekil 14. Simülasyon Ölçüm Değeri



Şekil 15. Model Çıktısı

Şebekeden çekilen akımın dalga şekli Şekil 16'da yer almaktadır.



Şekil 16. Şebekeden Çekilen Akım

IV. SONUÇ VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, elektrikli araçların şarj istasyonlarında kullanılmak üzere Geleneksel AA-DA dönüştürücü, Faz Kaydırmalı PFC Yükseltici ve Totem Kutuplu PFC Yükseltici topolojileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, Totem-Kutuplu PFC Yükseltici devresine ait toplam harmonik bozunum (THD) değerini yapay sinir ağı kullanarak hesaplamaktır. Bu amaç doğrultusunda, THD değerinin doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için veri toplama, işleme, eğitim, test ve doğrulama gibi aşamaları içeren bir model geliştirilmiştir. Elde edilen modelin simülasyon sonuçlarına yakın yanıtlar verdiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, makine öğrenimi teknikleriyle güç dönüştürücülerde THD analizine yönelik bir yaklaşım sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, farklı çalışma senaryolarını kapsayacak şekilde modellerin daha da geliştirilmesini, daha yüksek doğruluk için alternatif makine öğrenimi yöntemlerinin araştırılmasını ve bu yöntemlerin diğer dönüştürücü topolojilerine genellenmesini içerecektir.

V. TEŞEKKÜR

Bu akademik çalışma TÜBİTAK 2209-B - Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında desteklenmiştir.

Ayrıca, makalemizin hazırlanmasında değerli zamanlarını ayırarak bilimsel titizlikle değerlendirme yapan saygıdeğer hakemlerimize en derin teşekkürlerimizi iletmek isteriz. Kıymetli yorumları, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile çalışmamızın kalitesini ve bilimsel katkısını artırmamıza yardımcı oldular. Çalışmamızın alanımıza sağladığı katkılarda, onların rehberlik ve desteklerinin payı büyüktür. Teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Balci, I., Bodur, H., & Gundogan, A. (2022). Investigation of Single-Phase Single-Stage Isolated Power Factor Correction Circuits. ELECO 2022 Electrical-Electronics and Biomedical Engineering Conference, Bursa, Turkey, 24-26 November 2022.
- [2] Choi, W.Y., Kwon, J.M., Kim, E.H., Lee, J.J., & Kwon, B.H. (2007). Bridgeless Boost Rectifier With Low Conduction Losses and Reduced Diode Reverse-Recovery Problems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 54(2), 769-780.

- [3] Shuai, Z., Huang, W., Shen, C., Ge, J., & Shen, Z.J. (2017). Characteristics and Restraining Method of Fast Transient Inrush Fault Currents in Synchronverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 7487-7497.
- [4] Zobaa, A.F., & Abdel Aleem, S.H.E. (2014). A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(2), 1401-1412.
- [5] Meng, F., Xu, X., & Gao, L. (2017). A Simple Harmonic Reduction Method in Multipulse Rectifier Using Passive Devices. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), 2680-2692.
- [6] Guzman, J. I., Melin, P. E., Espinoza, J. R., Moran, L. A., Baier, C. R., Munoz, J. A., & Guinez, G. A. (2012). Digital implementation of selective harmonic elimination techniques in modular current source rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(2), 1167-1177.
- [7] Wen, H., Teng, Z., Wang, Y., & Hu, X. (2013). Spectral Correction Approach Based on Desirable Sidelobe Window for Harmonic Analysis of Industrial Power System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(3), 1001-1010.
- [8] Erickson, R.W., & Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics*. Kluwer Academic.
- [9] Pan, C.T., & Chen, T.C. (1993). Modeling and Design of an AC to DC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 8(4), 501-508.
- [10] Van Dijk, E., Spruijt, J.N., O'Sullivan, D.M., & Klaassens, J.B. (1995). PWM-Switch Modeling of DC-DC Converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10.
- [11] Karamanakos, P., Liegmann, E., Geyer, T., & Kennel, R. (2020). Model Predictive Control of Power Electronic Systems: Methods, Results, and Challenges. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 1, 95-114.
- [12] Wang, H., Li, G., Ma, Z., & Li, X. (2012). Application of Neural Networks to Image Recognition of Plant Diseases. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012)*, Yantai, China, 2159-2164.
- [13] Wu, B., Han, S., Shin, K.G., & Lu, W. (2018). Application of Artificial Neural Networks in Design of Lithium-ion Batteries. *Journal of Power Sources*, 128-136.
- [14] Simões, M.G., & Bose, B.K. (1996). Fuzzy Neural Network Based Estimation of Power Electronic Waveforms. *Eletrônica de Potência*, 1(1), 64-70.
- [15] Manitsas, E., Singh, R., Pal, B.C., & Strbac, G. (2012). Distribution System State Estimation Using an Artificial Neural Network Approach for Pseudo Measurement Modeling. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 1888-1896.
- [16] Texas Instruments. (2024). 4-kW, Single-Phase Totem Pole PFC Reference Design With C2000 and GaN. Technical Document.
- [17] Indalkar, S.S., & Sabnis, A. (2019). Comparison of AC-DC Converter Topologies Used for Battery Charging in Electric Vehicle. *2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, Kannur, India, 1624-1627.
- [18] Musavi, F., Edington, M., Eberle, W., & Dunford, W.G. (2012). Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 413-421.
- [19] Jimoh, B.A., & Roşu, Ş.G. (2023). Single-Phase AC-DC PFC Converters for EV Chargers: An Overview. *15th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Bucharest, Romania, 1-6.
- [20] Ortiz-Castrillón, J.R., Mejía-Ruiz, G.E., Muñoz-Galeano, N., López-Lezama, J.M., & Saldarriaga-Zuluaga, S.D. (2021). PFC Single-Phase AC/DC Boost Converters: Bridge, Semi-Bridgeless, and Bridgeless Topologies. *Applied Sciences*, 11, 7651.
- [21] Zhu, H., Hu, S., Fujishima, N., & Onishi, Y. (2021). Design Method of Totem-Pole PFC and CLLC Resonant Converter Based on SiC MOSFET. *6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Shanghai, China, 383-389.
- [22] Yan, Z., Zhong, S., Lin, L., & Cui, Z. (2021). Adaptive Levenberg–Marquardt Algorithm: A New Optimization Strategy for Levenberg–Marquardt Neural Networks. *Mathematics*, 9, 2176.
- [23] Zhao, L., & Otoo, C.O.A. (2019). Stability and Complexity of a Novel Three-Dimensional Environmental Quality Dynamic Evolution System. *Complexity*, 2019, 3941920.

A CBAM-Enhanced UNetFormer for Semantic Segmentation of Wheat Yellow-Rust Disease Using Multispectral Remote Sensing Images

İrem ÜLKÜ¹ 

¹Ankara University, Department of Computer Engineering, 06830, Ankara, Türkiye

Abstract

This study focuses on the problem of wheat yellow-rust disease caused by climate change and incorrect farming methods. Early detection of the disease, which manifests as yellow-orange spores on wheat leaves, is crucial for mitigating issues such as reduced crop yield, increased pesticide use, and environmental harm. Current CNN-based semantic segmentation models focus mainly on processing local pixels, which can be insufficient for large areas. This study proposes a novel version of the UNetFormer architecture, enhancing the CNN-based encoder with CBAM modules while utilizing a Transformer-based decoder to address the limitations of current approaches. Specifically, the model incorporates a Convolutional Block Attention Module (CBAM) to refine feature extraction along spatial and channel axes. CBAM modules allow the network to prioritize meaningful features, particularly near-infrared (NIR) wavelength reflections critical for detecting wheat yellow-rust. The proposed UNetFormer2 model effectively captures long-range dependencies in multispectral remote sensing images to improve disease detection across large agricultural areas. Specifically, the model achieves an IoU improvement of 2.1% for RGB, 4.6% for NDVI, and 3% for NIR compared to the baseline UNetFormer model. This work aims to improve wheat yellow-rust disease monitoring efficiency and contribute to more sustainable agricultural practices by reducing unnecessary pesticide application.

Keywords: Semantic segmentation, Remote sensing, Multispectral images, Wheat yellow-rust disease

I. INTRODUCTION

Wheat yellow rust is a common plant disease caused by climate changes and inappropriate agricultural management strategies [1]. Generally, the traditional management tool for wheat yellow rust disease is to implement chemical methods [2]. The current approach of chemical control, applied regardless of the disease's current status, leads to excessive pesticide use, causing environmental impacts such as groundwater pollution and the risk of pesticide residues in agricultural products. As the disease progresses, it manifests as yellow-orange spores on wheat leaves due to physical and chemical changes, such as decreased chlorophyll content and water levels in the leaves [3]. Multispectral bands are crucial in detecting the yellow-rust spores by providing discriminative information [4]. Remote sensing systems via satellite or aerial vehicles can dynamically monitor plant stress over large areas [5]. Convolutional neural networks (CNNs) applied to multispectral remote sensing images are attracting attention in the literature to detect wheat yellow rust disease [6-8]. However, the processing of local pixels or small regional information in these studies is often insufficient, especially for large agricultural areas, making it crucial to capture long-range dependencies [9].

Based on these discussions, this study proposes a novel version of UNetFormer that includes a CNN-based encoder and a Transformer-based decoder to capture long-range dependencies [10]. In the UNetFormer architecture, the ResNet18-based CNN encoder integrates channel and spatial information to extract meaningful features. This study proposes a Convolutional Block Attention Module (CBAM) [11] used in UNetFormer design to emphasize meaningful features along the channel and spatial axes. Indicators of wheat yellow rust, such as leaf color changes and reduced chlorophyll content, are detected using near-infrared (NIR) wavelength reflection [12, 13]. The proposed CBAM module enables UNetFormer to automatically learn the importance of the NIR wavelength for disease detection and suppress irrelevant wavelengths. Additionally, using the CBAM module allows the detection of even small lesions appearing in the early stages of the disease, thus enhancing the information flow efficiency within the UNetFormer architecture.

The structure of this paper is in the following manner: Section II presents a comprehensive review of existing semantic segmentation studies using remote sensing images. Section III introduces the core components of the proposed architecture, while Section IV provides information about the WYR image set used in this study. Section V covers implementation details and evaluation metrics, followed by visualization and analysis of the test results in Section VI. Finally, Section VII discusses the study's conclusions.

II. RELATED WORK

This section presents the most common semantic segmentation architectures. Early approaches use CNN models, but recent efforts also utilize transformers to yield better performance.

2.1. Convolutional Neural Networks (CNNs)

U-Net, with its symmetric expansion-contraction paths architecture, offers a deep network capable of capturing context while providing precise localization [14]. SegNet, on the other hand, performs pixel-wise semantic segmentation with an encoder-decoder architecture, using pooling indices obtained from the encoder to enable nonlinear upsampling in the decoder, thus achieving memory- and computation-efficient performance [15]. DeepLabv3+ combines atrous spatial pyramid pooling, which models contextual information at various scales, with a decoder module that enhances object boundaries, forming an efficient architecture [16]. BiSeNet is a real-time model balancing speed and segmentation performance by combining a spatial path that provides high-resolution location information with a context path that captures a large receptive field [17]. DFANet, an efficient CNN architecture, starts with a lightweight backbone and employs cascades of sub-networks and sub-stages to aggregate discriminative features, aiming to reduce parameter count while balancing speed and segmentation performance through multi-scale feature propagation [18]. D-LinkNet, designed for road extraction, combines dilated convolution and a pre-trained encoder while retaining the computational efficiency of the LinkNet architecture [19].

There are also many CNN-based studies on the pixel-wise classification of aerial imagery. For instance, LANet, a CNN-based architecture, improves performance in the semantic segmentation of remote sensing images by combining high-level semantic understanding with low-level location details [20]. Another CNN-based architecture, AFNet, performs effectively in complex urban landscapes with a Scale Feature Attention Module (SFAM) to detect objects of different sizes [21].

U-Net, with its symmetric expansion-contraction paths architecture, offers a deep network capable of capturing context while providing precise localization

[14]. SegNet, on the other hand, performs pixel-wise semantic segmentation with an encoder-decoder architecture, using pooling indices obtained from the encoder to enable nonlinear upsampling in the decoder, thus achieving memory- and computation-efficient performance [15]. DeepLabv3+ combines atrous spatial pyramid pooling, which models contextual information at various scales, with a decoder module that enhances object boundaries, forming an efficient architecture [16]. BiSeNet is a real-time model balancing speed and segmentation performance by combining a spatial path that provides high-resolution location information with a context path that captures a large receptive field [17]. DFANet, an efficient CNN architecture, starts with a lightweight backbone and employs cascades of sub-networks and sub-stages to aggregate discriminative features, aiming to reduce parameter count while balancing speed and segmentation performance through multi-scale feature propagation [18]. D-LinkNet, designed for road extraction, combines dilated convolution and a pre-trained encoder while retaining the computational efficiency of the LinkNet architecture [19].

2.2. Transformers

The Vision Transformer (ViT), solely based on transformers, applies the transformer architecture to sequences of image patches, achieving excellent results on various image recognition benchmarks [22]. A high-performing vision transformer, DeiT [23], suggests a distillation strategy that leverages tokens, using a CNN model as the teacher on the ImageNet-1k dataset [24]. Swin Transformer is a hierarchically organized transformer architecture that extracts representations through shifted windows [25]. SegFormer combines Transformers with efficient multilayer perceptron (MLP) decoders, offering robust semantic segmentation that operates without positional encoding [26]. Segmenter, a transformer model, uses contextual information at the image patch level to achieve label consensus and offers high performance by modeling the global context from the initial layer to produce class labels from the corresponding embedded outputs of image patches [27]. The SEgmentation TRansformer (SETR) architecture represents the image as a sequence of patches and modeling the global context at each layer [28]. TransUNet uses transformers to model long-range dependencies while capturing high-resolution local details with the U-Net architecture [29]. CCTUnet combines CNN and transformer to enhance the preservation of edge details in high-resolution input images and capture long-range dependencies [30].

Transformer-based architectures are also increasingly used with CNN-driven methods for the semantic understanding of remote sensing images, demonstrating superior performance. For instance,

EMRT, a hybrid architecture designed for high-resolution remote sensing images, aims to enhance multi-scale representation learning by combining the strength of CNNs in deriving local features with the capability of transformers in learning global patterns [31]. CTCFNet, a fused CNN-transformer structure for remote sensing images, improves segmentation accuracy by integrating local and global information to overcome occlusions of objects and surface features at different scales [32]. One study [33] employs a Swin Transformer-based encoder and CNN structures in the decoder to better model long-range spatial dependencies. The CMTFNet model extracts and combines local and global contextual information at multiple scales for remote sensing images [34]. ST-U-Net model strengthens the feature representation ability by embedding the Swin transformer within the U-Net structure for the pixel-wise classification of remote sensing imagery [35]. CSTUNet utilizes a two-stream encoder comprising a CNN-based primary encoder and a Swin transformer-assisted secondary encoder [36]. UNetFormer [10] is designed for real-time segmentation of urban scene images in remote sensing and uses a lightweight ResNet18 encoder, offering an effective attention mechanism that jointly processes global and local information. This study proposes to adaptively focus on essential features in both the channel and spatial dimensions by utilizing the CBAM module in the UNetFormer design for the semantic segmentation of wheat yellow rust disease.

III. MATERIALS AND METHODS

Figure 1 illustrates the proposed architecture, where each feature map obtained from the CNN-based encoder is passed through a separate CBAM module to enhance adaptive feature improvement. The CBAM modules generate attention maps along the channel and spatial dimensions. Then, these complementary attentions are multiplied with the input feature maps to serve as the refined output. This process allows the model to learn to emphasize features that are supposed to ease the detection of wheat yellow-rust objects while suppressing irrelevant ones. Finally, the transformer-based decoder generates the segmentation output. The following sections explain the details of the architecture.

3.1. Encoder

The encoder structure, consisting of four blocks and shown in Figure 1, is designed to extract multi-scale semantic features using the pre-trained ResNet18 model [37]. ResNet18, chosen for its relatively lightweight architecture with four blocks, performs downsampling by a factor of 2 at each block. Assuming that R_k represents the output of each ResNet block, where k represents the block layer level, there are four levels in total. The resulting output is A_k when using a CBAM module for each block k . Therefore, each ResNet block output processed through the CBAM module is as follows:

$$A_k = CBAM(R_k) \quad (1)$$

Each feature map A_k produced by the CBAM is combined with the corresponding feature maps in the decoder using a weighted sum with a 1×1 convolution. The final fused feature map, denoted as FF_k , is obtained as follows:

$$FF_k = \alpha \cdot A_k + (1 - \alpha) \cdot GLF_k \quad (2)$$

where α is the weighting coefficient, and GLF_k represents the decoder feature map at the corresponding level.

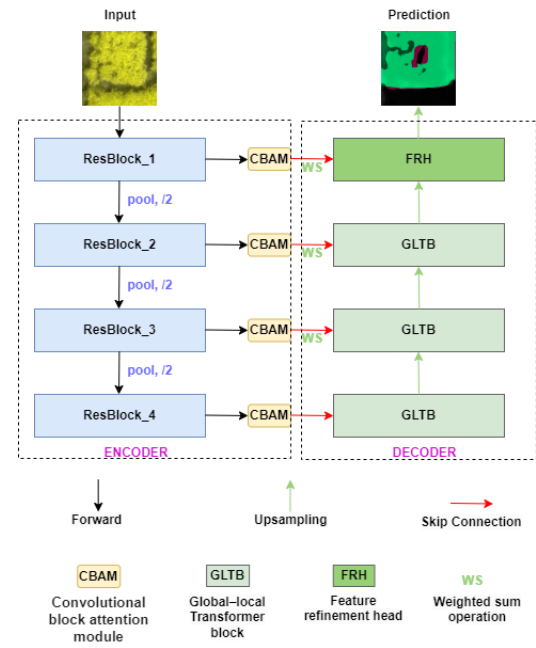


Figure 1. Overview of the proposed UNetFormer2 architecture

3.1.1. CBAM modules

For each feature map $R_k \in R^{C_k \times H_k \times W_k}$ obtained from the ResNet18 blocks, a separate CBAM module processes it to produce a channel attention map $M_c \in R^{C_k \times 1 \times 1}$ and a spatial attention map $M_s \in R^{1 \times H_k \times W_k}$. Figure 2 illustrates the CBAM module operations, which are detailed below:

$$A'_k = M_c(R_k) \otimes R_k \quad (3)$$

$$A_k = M_s(A'_k) \otimes A'_k \quad (4)$$

where $\otimes$ denotes element-wise multiplication, and A_k is the final output obtained for each level k .

The CBAM obtains channel attention by compressing the spatial dimension using the average-pooled features R_{avg}^c and max-pooled features R_{max}^c . Figure 2 shows how these feature maps pass through a multi-layer perceptron (MLP) network with a single hidden

layer, which then computes the channel attention map $M_c \in R^{C_k \times 1 \times 1}$ by combining the output features element-wise as follows:

$$\begin{aligned} M_c(R_k) &= \sigma \left(MLP(R_{avg}^c) + MLP(R_{max}^c) \right) \\ &= \sigma \left(W_1 \left(W_0(R_{avg}^c) \right) + W_1 \left(W_0(R_{max}^c) \right) \right) \end{aligned} \quad (5)$$

where $W_0 \in R^{C_k/r \times C_k}$ and $W_1 \in R^{C_k \times C_k/r}$ are the weights of the MLP network. These weights remain shared across all inputs. The final sigmoid function appears as σ , and a ReLU activation function applies after W_0 .

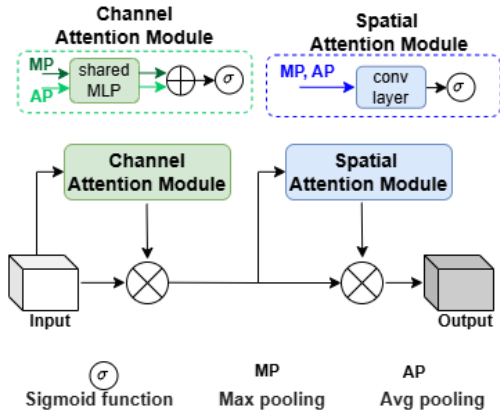


Figure 2. CBAM structure

To compute spatial attention, as shown in Figure 2, the outputs $R_{avg}^s \in R^{1 \times H_k \times W_k}$ and $R_{max}^s \in R^{1 \times H_k \times W_k}$, obtained by applying average pooling and max pooling operations along the channel axis, are combined. A convolutional layer with a filter size of 7×7 , denoted as $f^{7 \times 7}$, is then applied to this combined feature map to produce the spatial attention map $M_s \in R^{H_k \times W_k}$ as follows:

$$M_s(R_k) = \sigma \left(f^{7 \times 7}([R_{avg}^s; R_{max}^s]) \right) \quad (6)$$

3.2. Decoder

The decoder section consists of three global-local Transformer blocks and one feature enhancement head, as shown in Figure 1. The following sections explain all these processes in detail.

3.2.1. Global-local transformer block (GLTB)

Figure 3 illustrates the global-local attention structure that the GLTB block uses. It consists of parallel local and global branches that process the input simultaneously. Each feature map $A_k \in R^{C_k \times H_k \times W_k}$ obtained from the CBAM blocks undergoes a 1×1 convolution operation, adjusting the channel size to a fixed value of $C = 64$. The resulting feature map $A''_k \in R^{B \times C \times H_k \times W_k}$ serves as input to both the local and global branches, with a batch size of B . The local branch extracts both small and large-scale local features from the 2D feature map A''_k by passing it through 1×1 and 3×3 convolution operations

separately. After applying batch normalization (BN) to each output, the branch combines the results.

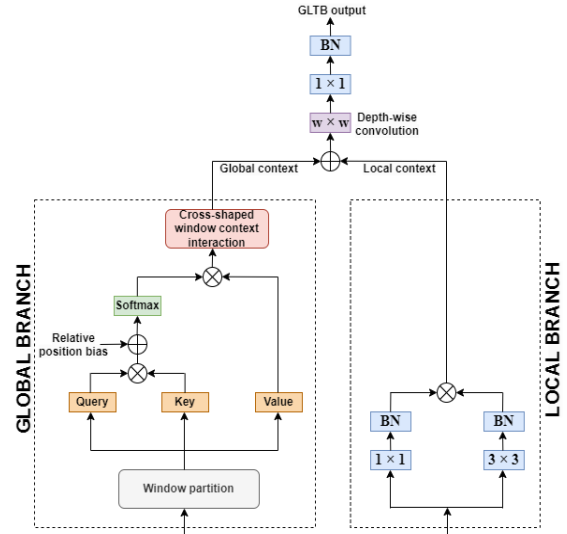


Figure 3. Illustration of GLTB blocks

The global branch aims to capture global context by applying window-based multi-head self-attention to the input $A''_k \in R^{B \times C \times H_k \times W_k}$, as shown in Figure 4. First, a 1×1 convolution is applied to the feature map A''_k to triple the channel size. When the dimension becomes $R^{B \times 3C \times H_k \times W_k}$, it provides more feature information related to each pixel. Next, the window partitioning operation sets the window size to $w \times w$, resulting in an output dimension of $R^{B \times 3C \times (H_k/w) \times (W_k/w) \times w \times w}$. The process resizes the information in each $w \times w$ window into a 1D array suitable for the attention mechanism.

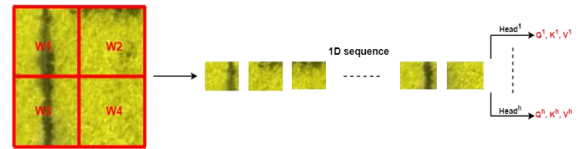


Figure 4. Illustration of window partitioning

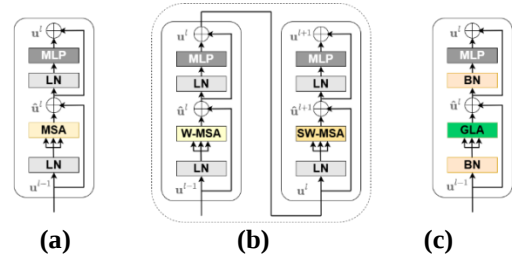


Figure 5. (a) Transformer block structure. (b) Swin Transformer block structure. (c) UNetFormer Transformer block structure.

When the attention mechanism uses h multi-heads, it defines the dimension for each head as $R^{B \times 3 \times h \times (\frac{C}{h}) \times (H_k/w) \times (W_k/w) \times (w \times w)}$. The 1D arrays

obtained for each head convert into query (Q), key (K), and value (V) vectors.

The original Swin Transformer architecture uses a window shifting mechanism (Figure 5) to slightly shift the windows in consecutive Swin Transformer layers, allowing information interaction between neighboring windows; however, this process also increases the computational load. In contrast, UNetFormer employs a cross-shaped window context interaction module to capture intra-window and inter-window long-range relationships within a transformer layer at a lower computational cost. UNetFormer Transformer block is illustrated in Figure 5(c).

The cross-shaped window context interaction module, visualized in Figure 6, combines two feature maps generated by horizontal and vertical average pooling layers to obtain global context. The dependency of any point $p_1^{(m,n)}$ in Window 1 on the point $p_2^{(m+w,n)}$ in Window 2 is calculated as follows:

$$p_1^{(m,n)} = \frac{\sum_{i=0}^{w-m-1} p_1^{(m+i,n)} + \sum_{j=0}^m p_2^{(m+w-j,n)}}{w} \quad (7)$$

$$= \frac{\sum_{i=0}^{w-m-1} D_i(p_1^{(m,n)}) + \sum_{j=0}^m D_j(p_2^{(m+w,n)})}{w}$$

$$p_1^{(m+i,n)} = D_i(p_1^{(m,n)}) \quad (8)$$

$$p_2^{(m+w-j,n)} = D_j(p_2^{(m+w,n)}) \quad (9)$$

where w denotes the window size and D represents the self-attention computation used to model the interactions of pixel pairs within a window. For example, the interaction between a point $p_1^{(m,n)}$ from Window 1 and any other point $p_1^{(m+i,n)}$ within the same window is expressed by equation (8).

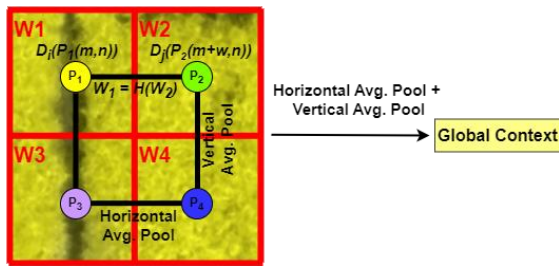


Figure 6. Illustration of cross-shaped window context interaction module operations

Equation (9) calculates the interaction between a point $p_2^{(m+w,n)}$ within Window 2 and any other point $p_2^{(m+w-j,n)}$ in this window. The horizontal relationship between the point $p_1^{(m,n)}$ in Window 1 and the point $p_2^{(m+w,n)}$ in Window 2 is established by equation (7). The same equation also enables the calculation of the vertical relationship between the

point $p_1^{(m,n)}$ in Window 1 and a point $p_3^{(m,n+w)}$ in Window 3. This process is beneficial to extract long-range dependencies between any two windows and to construct the global context.

3.2.2. Feature refinement head (FRH)

The FRH structure aims to enhance segmentation accuracy by closing the information gap between shallow and deep feature maps through a refined merging process, using the combined feature map FF_k shown in equation (2) as input. As illustrated in Figure 7, a global average pooling layer creates a channel-wise attention map $C \in R^{1 \times 1 \times c}$ with c channel dimension. The reduce & expand operation applied at this stage consists of two 1×1 convolution layers that reduce the channel size by a factor of 4 and then expand it back to its original size.

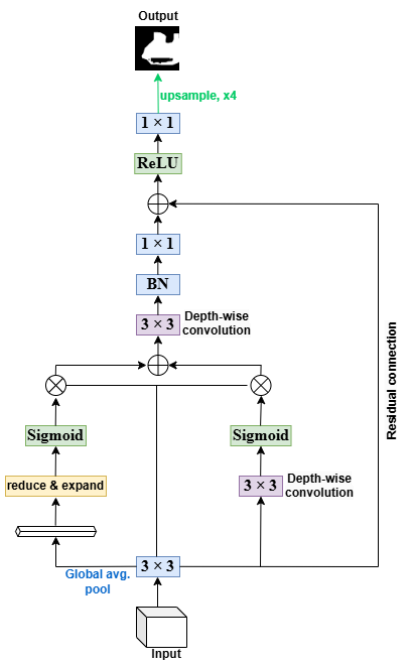


Figure 7. Illustration of FRH operations

Meanwhile, a depth-wise convolution applies to produce a spatial-wise attention map $S \in R^{h \times w \times 1}$ for h and w spatial resolutions. The feature maps obtained from the two parallel paths are combined. Adding the residual connection at this part is a powerful tool to prevent potential information loss. Subsequently, a 1×1 convolution layer and an upsampling operation are applied. As a result, the process produces a segmentation map that encodes detailed spatial information and semantic meaning.

IV. RESULTS

The experiments evaluate the proposed UNetFormer2 model on the wheat yellow rust disease image set and compare it with state-of-the-art (SOTA) semantic segmentation models. This section describes the implementation details, image set, and experimental results.

4.1. Implementation Details

The models are trained with an initial learning rate of 5×10^{-5} , using a strategy where the learning rate decreases by 9% every ten epochs on an NVIDIA Quadro RTX 5000 GPU. The selected optimizer is the Adam optimizer with a momentum value of 0.9 and a batch size of 8. The experiments run for 70 epochs, with 5-fold cross-validation employed. All images, originally sized 1336×2991 pixels, are divided into 224×224 pixel-sized patches with overlap, resulting in 1299 patches. The image set, which is not publicly available, has a sample distribution of 72% for training, 20% for testing, and 8% for validation, with the split determined based on the convention established in [8]. Hyperparameters are manually tuned based on prior experience and experimental results.

4.2. The Wheat Yellow-Rust (WYR) Image Set

The WYR image set comes from field experiments conducted in 2019 at the Caoxinzhuang Experimental Station in the Yangling region of China to monitor yellow-rust disease in wheat plants [9]. The experiments focus on Xiaoyan 22 wheat, a variety susceptible to this disease. Yellow-rust inoculates wheat plots measuring $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$.

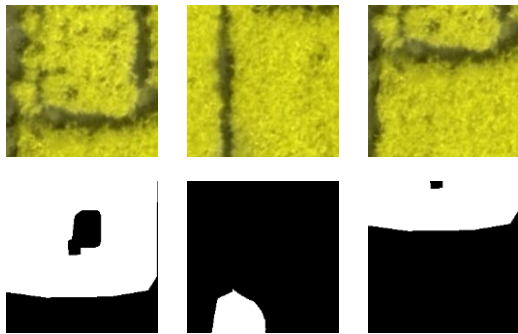


Figure 8. Examples of the WYR image set. The first row shows the input images, which are visualized using three selected bands from the multispectral dataset mapped to the RGB channels. The second row shows the ground-truth binary masks for wheat yellow rust.

A DJI Matrice 100 (M100) Quad-copter and a RedEdge multispectral camera capture images at a flight height of 20 meters, achieving a spatial resolution of 1.3 cm/pixel. The RedEdge camera captures images in the blue, green, red, red-edge, and NIR bands. Manual labeling identifies pixels representing yellow-rust disease in the images. Selected images from the WYR image set appear in Figure 8.

4.3. Performance Evaluation

IoU (Intersection over Union) and F_1 score are the semantic segmentation evaluation metrics used in the experiments. IoU shows the intersection between the ground truth and predicted pixels. The F_1 score is the

harmonic mean of recall and precision calculations. Precision indicates the percentage of correctly predicted yellow-rust pixels among all pixels identified as yellow-rust. Recall measures how many of the actual yellow-rust pixels are correctly identified by the model. IoU and F_1 score calculations are as follows:

$$IoU = \frac{TP}{(TP + TN + FP)} \quad (10)$$

$$F_1 = \frac{(2 \times \text{Precision} \times \text{Recall})}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (11)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (12)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (13)$$

where TP represents the yellow-rust pixels predicted correctly, FP represents the pixels incorrectly predicted as yellow-rust, FN represents the missed yellow-rust pixels, and TN represents the pixels correctly predicted as not yellow-rust.

4.4. Experimental results

The experiments compare the proposed UNetFormer2 with various SOTA semantic segmentation models on the WYR image set. The selected SOTA models are U-Net [14], SegNet [15], DLinkNet [19], NestedU-Net [38], DeepLabV3 [16], BiSeNet [17], DFANet [18], UNetFormer [10]. The quantitative results for RGB, NDVI, and NIR images are provided in Tables 1, 2, and 3, respectively.

Table 1. Quantitative comparison of the WYR test set results against SOTA models by using RGB images.

The bold values indicate the best performance.

Architectures	RGB Images	
	IoU	F_1
U-Net	0.521±0.294	0.647±0.333
SegNet	0.545±0.347	0.620±0.372
DLinkNet	0.608±0.296	0.702±0.295
NestedU-Net	0.615±0.264	0.718±0.242
DeepLabV3	0.426±0.315	0.527±0.321
BiSeNet	0.435±0.318	0.535±0.319
DFANet	0.489±0.321	0.587±0.320
UNetFormer	0.664±0.241	0.769±0.203
UNetFormer2 (Proposed)	0.685±0.235	0.784±0.210

Table 1 shows the experimental test results for semantic segmentation on the WYR image set using RGB images. UNetFormer2 surpasses the original

UNetFormer with the best performance among all the SOTA models by a 2.1% gain in IoU on the test set. UNetFormer2 consistently outperforms lightweight semantic segmentation models, i.e., BiSeNet and DFANet, by 25% and 19.6%, respectively. In addition, against the CNN-based NestedU-Net, UNetFormer2 produces a promising gain of 7%, yielding a new state-of-the-art for RGB images with 0.685 IoU.

Table 2. Quantitative comparison of the WYR test set results against SOTA models by using NDVI images. The bold values indicate the best performance.

Architectures	NDVI Images	
	IoU	F_1
U-Net	0.502±0.355	0.582±0.353
SegNet	0.469±0.366	0.545±0.378
DLinkNet	0.472±0.298	0.575±0.304
NestedU-Net	0.560±0.292	0.653±0.279
DeepLabV3	0.465±0.311	0.565±0.308
BiSeNet	0.497±0.297	0.605±0.299
DFANet	0.448±0.323	0.546±0.330
UNetFormer	0.515±0.320	0.615±0.313
UNetFormer2 (Proposed)	0.561±0.290	0.666±0.282

In Table 2, the experiments inspect the effect of vegetation indices to find out which model is more promising for the semantic segmentation of NDVI images. Compared to UNetFormer, the proposed model performs more accurately in NDVI images and improves the IoU and F_1 score metrics. It achieves 4.6% in IoU, which outperforms the original UNetFormer model. Compared to the NestedU-Net, one of the best-performing models for NDVI images, the proposed model obtains the F_1 score improvement of 1.3% on the test set. This result demonstrates that the output feature maps produced by UNetFormer2 effectively emphasize more meaningful features semantically related to the wheat yellow-rust regions. Compared to U-Net, UNetFormer2 achieves 5.9% and 8.4% gains on the IoU and F_1 performances, respectively.

The experimental test results in Table 3 analyze the effectiveness of UNetFormer2 by extending the spectral channels to NIR wavelengths. Compared to UNetFormer, the proposed model demonstrates a 3% improvement in IoU on NIR images, effectively capturing the wheat yellow-rust regions. UNetFormer2 increases IoU by 9.5% compared to DLinkNet, confirming that it can predict the wheat yellow-rust pixels more in line with ground truth.

Moreover, UNetFormer2 improves IoU on NIR images by 14.4% compared to BiSeNet, the classical real-time model, while increasing the F_1 score by 12.8%. The proposed model also achieves promising performance among the classical CNN-based architectures like U-Net, SegNet, DLinkNet, NestedU-Net, and DeepLabV3. The proposed model with the ResNet18 backbone outperforms all other SOTA models and sets new state-of-the-art with an IoU score of 0.718 on the NIR test set.

Table 3. Quantitative comparison of the WYR test set results against SOTA models by using NIR images. The bold values indicate the best performance.

Architectures	NIR Images	
	IoU	F_1
U-Net	0.522±0.260	0.645±0.235
SegNet	0.466±0.312	0.562±0.322
DLinkNet	0.623±0.261	0.728±0.235
NestedU-Net	0.677±0.194	0.786±0.152
DeepLabV3	0.576±0.286	0.684±0.264
BiSeNet	0.574±0.248	0.694±0.217
DFANet	0.481±0.285	0.594±0.276
UNetFormer	0.688±0.200	0.796±0.159
UNetFormer2 (Proposed)	0.718±0.183	0.822±0.135

The proposed model demonstrates that the CBAM blocks added to the UNetFormer enhance its ability to detect and localize regions related to wheat yellow-rust disease, significantly improving IoU and F_1 score metrics in RGB, NDVI, and NIR images compared to the experimental baseline. Results highlight how the enhanced model better identifies and emphasizes the relevant semantic regions associated with the disease.

Figure 9 shows some example qualitative results. The predictions in the last column, generated by the proposed UNetFormer2 model, demonstrate several qualitative improvements over the other SOTA models. For instance, in the first and third rows, the UNetFormer2 predictions show larger light green areas closely matching the ground truth, indicating higher accuracy in detecting yellow-rust-affected pixels. Additionally, the boundaries of the diseased regions are more precisely delineated in the UNetFormer2 predictions, as seen in the second and fifth rows, suggesting that the proposed model captures the disease boundaries more accurately. Moreover, the reduced number of missed predictions across various samples highlights the UNetFormer2's ability to minimize missed detections, providing a more comprehensive segmentation of affected areas.

These improvements make the proposed model a robust choice for accurately identifying wheat yellow-rust disease in NIR images.

Finally, Table 4 shows the computational complexity comparisons of the UNetFormer2 with SOTA models regarding giga floating point operations per second (GFLOPs) and inference time in frames per second (FPS). The utilized GPU is NVIDIA Quadro RTX 5000 for all inference time measurements with $224 \times 224 \times 3$ image resolution. UNetFormer2 has a slightly worse FPS value (103.61) than the baseline UNetFormer (104.92), yet it maintains roughly similar GFLOPs, suggesting a more accurate architecture with high efficiency.

Table 4. Computational complexity comparisons.

Architectures	GFLOPs	FPS
U-Net	190.07	20.48
SegNet	245.80	18.44
DLinkNet	51.43	47.90
NestedU-Net	849.3	5.58
DeepLabV3	133.7	18.30
BiSeNet	34.82	80.60
DFANet	2.73	48.12
UNetFormer	17.95	104.92
UNetFormer2 (Proposed)	18.32	103.61

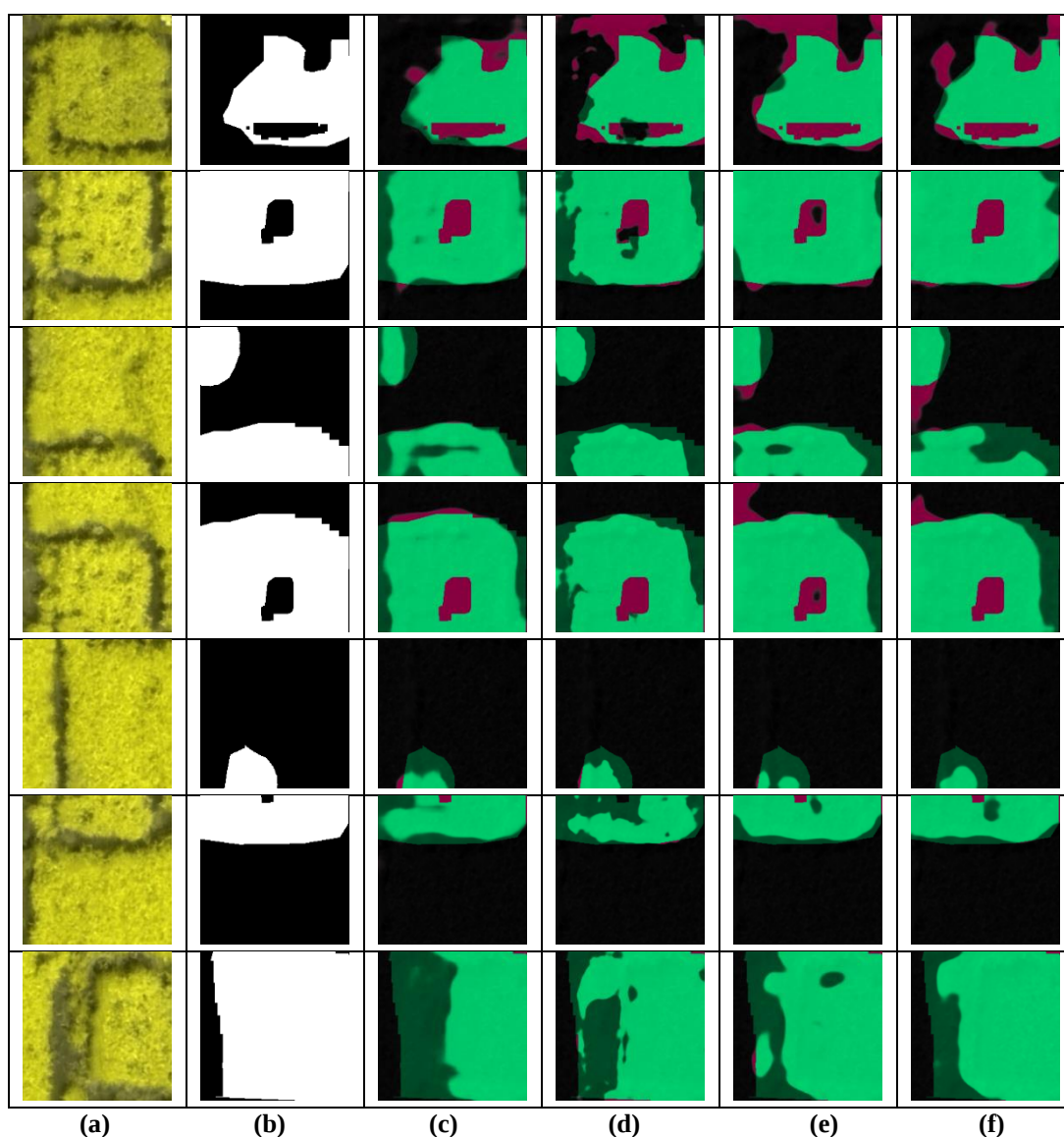


Figure 9. Visual results on NIR test set. Green represents accurate predictions, dark green marks undetected regions, and red highlights false positives. (a) Input images; (b) Ground-truths; (c) BiSeNet; (d) NestedU-Net; (e) UNetFormer; and (f) UNetFormer2 (Proposed).

V. CONCLUSION

This paper proposes UNetFormer2 for wheat yellow-rust disease semantic segmentation in multispectral remote sensing imagery. This approach alleviates the limitations of existing CNN-based models that primarily process local pixel information. UNetFormer2 integrates the CBAM modules into the baseline UNetFormer model to prioritize NIR reflections and boost segmentation accuracy. The CBAM modules improve the discrimination of the relevant features along spatial and channel axes associated with the early disease indicators. These modules focus more on the discriminative NIR reflections to improve the early detection of wheat yellow-rust disease across large agricultural areas.

The experimental results confirm that the UNetFormer2 model has superior performance, underscoring its capability to prioritize crucial features and suppress irrelevant information. Specifically, the model's improved IoU and F_1 scores indicate enhanced precision in detecting disease-affected regions, achieving an IoU improvement of 2.1% for RGB, 4.6% for NDVI, and 3% for NIR compared to baseline. These enhancements facilitate a more reliable solution for wheat yellow-rust disease monitoring, potentially reducing excessive pesticide application and promoting sustainable agriculture by targeting treatment areas accurately.

REFERENCES

- [1] Zhang, X., Han, L., Dong, Y., Shi, Y., Huang, W., Han, L., González-Moreno, P., Ma, H., Ye, H., & Sobeih, T. (2019). A deep learning-based approach for automated yellow rust disease detection from high-resolution hyperspectral UAV images. *Remote Sensing*, 11(13), 1554.
- [2] Mi, Z., Zhang, X., Su, J., Han, D., & Su, B. (2020). Wheat stripe rust grading by deep learning with attention mechanism and images from mobile devices. *Frontiers in Plant Science*, 11, 558126.
- [3] Zhang, J., Pu, R., Loraamm, R. W., Yang, G., & Wang, J. (2014). Comparison between wavelet spectral features and conventional spectral features in detecting yellow rust for winter wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 100, 79–87.
- [4] Liu, W., Yang, G., Xu, F., Qiao, H., Fan, J., Song, Y., & Zhou, Y. (2018). Comparisons of detection of wheat stripe rust using hyperspectral and UAV aerial photography. *Acta Phytopathologica Sinica*, 48(2), 223–227.
- [5] Su, J., Yi, D., Coombes, M., Liu, C., Zhai, X., McDonald-Maier, K., & Chen, W. H. (2022). Spectral analysis and mapping of blackgrass weed by leveraging machine learning and UAV multispectral imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106621.
- [6] Zhang, T., Xu, Z., Su, J., Yang, Z., Liu, C., Chen, W. H., & Li, J. (2021). IR-UNet: Irregular segmentation U-shape network for wheat yellow rust detection by UAV multispectral imagery. *Remote Sensing*, 13(19), 3892.
- [7] Su, J., Yi, D., Su, B., Mi, Z., Liu, C., Hu, X., Xu, X., Guo, L., & Chen, W.-H. (2021). Aerial visual perception in smart farming: Field study of wheat yellow rust monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(3), 2242–2249.
- [8] Ulku, I. (2024). ResLMFFNet: A real-time semantic segmentation network for precision agriculture. *Journal of Real-Time Image Processing*, 21(4), 101.
- [9] Su, J., Liu, C., & Chen, W. H. (2022). UAV multispectral remote sensing for yellow rust mapping: Opportunities and challenges. In *Unmanned Aerial Systems in Precision Agriculture: Technological Progresses and Applications* (pp. 107–122). Springer, Singapore.
- [10] Wang, L., Li, R., Zhang, C., Fang, S., Duan, C., Meng, X., & Atkinson, P. M. (2022). UNetFormer: A UNet-like transformer for efficient semantic segmentation of remote sensing urban scene imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 190, 196–214.
- [11] Woo, S., Park, J., Lee, J. Y., & Kweon, I. S. (2018). CBAM: Convolutional block attention module. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)* (pp. 3–19).
- [12] Ulku, I., Tanriover, O. O., & Akagündüz, E. (2024). LoRA-NIR: Low-Rank Adaptation of Vision Transformers for Remote Sensing with Near-Infrared Imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21, 1–5.
- [13] Ulku, I., Akagündüz, E., & Ghamisi, P. (2022). Deep semantic segmentation of trees using multispectral images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 7589–7604.
- [14] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention–MICCAI 2015* (pp. 234–241).
- [15] Badrinarayanan, V., Kendall, A., & Cipolla, R. (2017). SegNet: A deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(12), 2481–2495.
- [16] Chen, L. C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., & Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)* (pp. 801–818).

- [17] Yu, C., Wang, J., Peng, C., Gao, C., Yu, G., & Sang, N. (2018). BiSeNet: Bilateral segmentation network for real-time semantic segmentation. In *Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV)* (pp. 325–341).
- [18] Li, H., Xiong, P., Fan, H., & Sun, J. (2019). DFANet: Deep feature aggregation for real-time semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (pp. 9522–9531).
- [19] Zhou, L., Zhang, C., & Wu, M. (2018). D-LinkNet: LinkNet with pretrained encoder and dilated convolution for high-resolution satellite imagery road extraction. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, (pp. 182–186).
- [20] Ding, L., Tang, H., & Bruzzone, L. (2020). LANet: Local attention embedding to improve the semantic segmentation of remote sensing images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(1), 426–435.
- [21] Liu, R., Mi, L., & Chen, Z. (2020). AFNet: Adaptive fusion network for remote sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(9), 7871–7886.
- [22] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- [23] Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L. J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (pp. 248–255).
- [24] Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. *International Conference on Machine Learning*, (pp. 10347–10357).
- [25] Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin Transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, (pp. 10012–10022).
- [26] Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., & Luo, P. (2021). SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with transformers. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34, 12077–12090.
- [27] Strudel, R., Garcia, R., Laptev, I., & Schmid, C. (2021). Segmenter: Transformer for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, (pp. 7262–7272).
- [28] Zheng, S., Lu, J., Zhao, H., Zhu, X., Luo, Z., Wang, Y., Fu, Y., Feng, J., Xiang, T., Torr, P. H. S., & Zhang, L. (2021). Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, (pp. 6881–6890).
- [29] Chen, J., Lu, Y., Yu, Q., Luo, X., Adeli, E., Wang, Y., Lu, L., Yuille, A. L., & Zhou, Y. (2021). TransUNet: Transformers make strong encoders for medical image segmentation. *arXiv preprint arXiv:2102.04306*. <https://arxiv.org/abs/2102.04306>.
- [30] Yan, Y., Liu, R., Chen, H., Zhang, L., & Zhang, Q. (2023). CCT-UNet: A U-shaped network based on convolution coupled transformer for segmentation of peripheral and transition zones in prostate MRI. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 27(9), 4341–4351.
- [31] Xiao, T., Liu, Y., Huang, Y., Li, M., & Yang, G. (2023). Enhancing multiscale representations with transformer for remote sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1–16.
- [32] Lu, C., Zhang, X., Du, K., Xu, H., & Liu, G. (2024). CTCFNet: CNN-Transformer complementary and fusion network for high-resolution remote sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1–17.
- [33] Zhang, C., Jiang, W., Zhang, Y., Wang, W., Zhao, Q., & Wang, C. (2022). Transformer and CNN hybrid deep neural network for semantic segmentation of very-high-resolution remote sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–20.
- [34] Wu, H., Huang, P., Zhang, M., Tang, W., & Yu, X. (2023). CMTFNet: CNN and multiscale transformer fusion network for remote-sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1–12.
- [35] He, X., Zhou, Y., Zhao, J., Zhang, D., Yao, R., & Xue, Y. (2022). Swin transformer embedding UNet for remote sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1–15.
- [36] Fan, L., Zhou, Y., Liu, H., Li, Y., & Cao, D. (2023). Combining Swin Transformer with UNet for remote sensing image semantic segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1–11.

-
- [37] He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (pp. 770–778).
- [38] Zhou, Z., Rahman Siddiquee, M. M., Tajbakhsh, N., & Liang, J. (2018). UNet++: A nested U-Net architecture for medical image segmentation. In *Proceedings of DLMA*, (pp. 3–11).

The Evaluation of Methane Gas Explosion Risk in Confined Spaces – A Case Study in the Ship Building Industry

Ferdi ÇALIK ¹ 

¹İÇDAŞ Çelik Enerji Tersane Ulaşım Sanayi A.Ş., Değirmencik Shipyard / Ship Building Department, Çanakkale,
Turkey

Abstract

Hydrocarbon gas explosions such as methane gas in confined spaces represent a significant hazard across various industries, particularly mining, oil and gas extraction, and oxy-cutting processes. The risks associated with methane accumulation are exacerbated by the unique characteristics of confined spaces, where gas concentrations can reach explosive levels. The explosive potential of methane is primarily influenced by its concentration in the air. Understanding the conditions under which methane becomes hazardous is crucial for developing effective safety protocols and mitigation strategies.

This study is based on a truth gas leak near-miss incident in the shipyard ship building department. Before this study, there were many records of gas leaks due to hose and torch connection points and hose damage in oxy-fuel cutting operations. During the confined spaces (ballast, cargo, service, settling tanks etc.) gas free measurements on April 8, 2024, we detected a methane gas leak reaching explosive concentrations originating from a damaged welding hose. In this study, the question of what would happen if this explosive atmosphere in the confined space exploded under optimum conditions was answered.

According to the results of the study, the explosive methane gas concentration in a 169 m³ confined space (ballast tank) was approximately 10 kg methane gas mass, and the methane gas leak of 80 % of the hose cross-section diameter reached an explosive concentration within 15 minutes. The amount of 10 kg methane gas leaking into the 169 m³ confined space was equivalent to the 95000 ppm (9.5 % v/v) methane gas concentration required to provide optimum explosion conditions. After an explosion caused by 10 kg of methane gas in the ballast tank (169 m³), a worker standing 1 m away will be exposed to 1523 kPa of overpressure. 10 kg methane gas used for the explosion scenario represents the stoichiometric fuel/air mixture (95000 ppm). When the evaluation is made by taking into account the 1 s positive phase duration, the mortality rate due to lung damage, which is one of the organs most exposed to air, means that a person standing 1 m away is exposed to 1523 kPa overpressure and the probability of death (Pr) is estimated as 93%. This result may have more dramatic consequence depending on the number of people in the ballast tank.

Keywords: Gas explosion, Explosion risk in confined spaces, Consequence Analysis

I. INTRODUCTION

Natural gas (methane, CH₄) is a safe energy source that is extensively used in daily life particularly in residential and industrial sectors. However, it poses significant risks in confined spaces due to its explosion potential. The risk of methane explosion increases in confined environments with limited ventilation, leading to rapid accumulation of gas within these areas. This situation presents a serious hazard for workers in industries where exposure to methane is common such as shipbuilding (Rajakumar and Choi, 2023). The research showing the fatal occupational accidents and their causes in the shipbuilding sector in Turkey is shared in Figure 1.

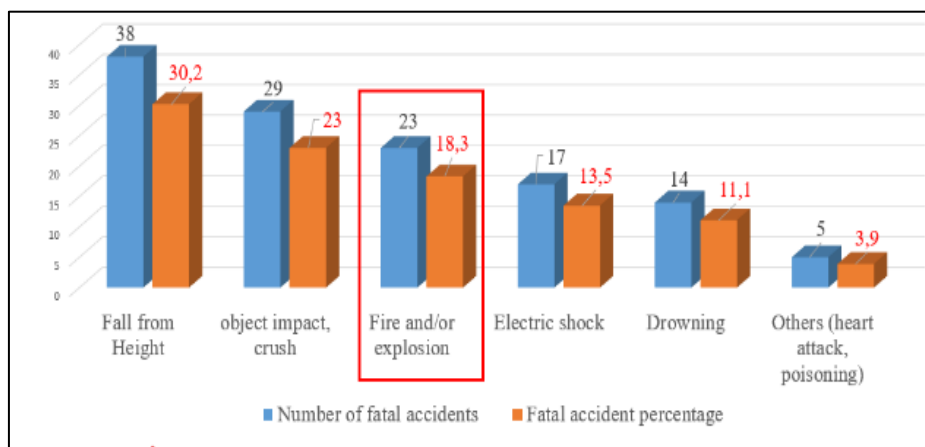


Figure 1. Classification of Fatal Work Accidents in the Shipbuilding Industry [1]

According to Figure 1; the causes of fatal occupational accidents in the shipbuilding industry in Turkey, have been examined under 6 (six) main headings and the number of fatal occupational accidents caused by fire/explosion is at an alarming level. Almost all fire/explosion accidents are caused by chemicals such as gases and solvents that create flammable and explosive atmospheres in confined spaces. Methane gas can form explosive mixtures when present in the air at concentrations ranging from approximately 5% to 15% by volume, known as the lower explosive limit (LEL) and upper explosive limit (UEL), respectively (Jia, 2023). The methane gas, which is a critical concern in confined spaces, can accumulate to hazardous levels and

create a severe explosion when ignited by an ignition source (such as an open flame, hot surface, sparks or static electric) at concentrations ranging from 50.000 to 150.000 ppm (lower explosive limit: 5%, upper explosive limit: 15% v/v) (Ma. Et al., 2012). Experimental studies in the literature indicate that optimum explosion conditions are achieved when the CH_4 /Air stoichiometric ratio reaches approximately 9.5%, v/v (95.000 ppm) [2]. In particular, methane gas leaks are one of the most frequently encountered major incidents in the shipbuilding sector, where methane is extensively used for processes such as oxyfuel cutting of metals and annealing.

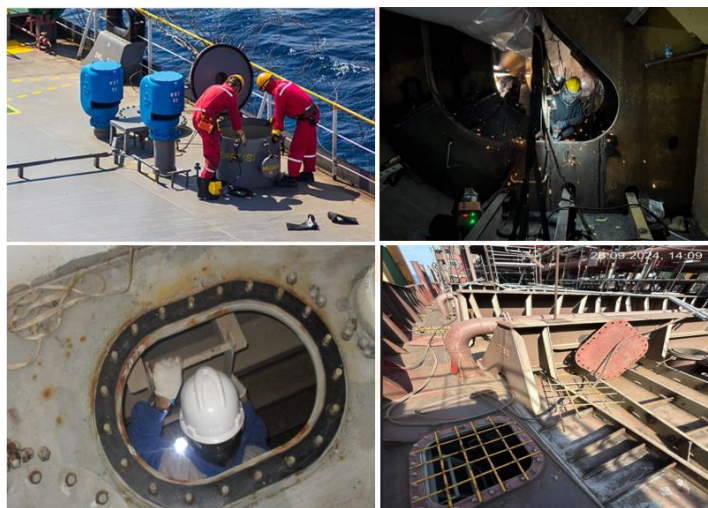


Figure 2. Ballast Tanks – Ship Building Industry

In this study; the results of a near-miss incident that occurred on April 8, 2024 with the leakage of CH₄ gas from a torch hose connection point left open in the port side number 5 ballast tank were discussed with the Consequence Analysis Modeling Approach (CAMA). The potential for explosion is higher in confined spaces where gas concentrations may exceed safe thresholds. Research suggests that concentrations of methane above 15% in vapor form can pose explosive hazards. The most important reasons for confined space gas leaks, which are very common in the shipyard industry where the Positive Work Safety Culture is not at the expected level, are as follows;

- Lack of Training
- Torches and gas hoses forgotten/left behind at the end of work in closed areas
- Use of attached hoses in closed areas that do not comply with the TS EN 3821 standard.

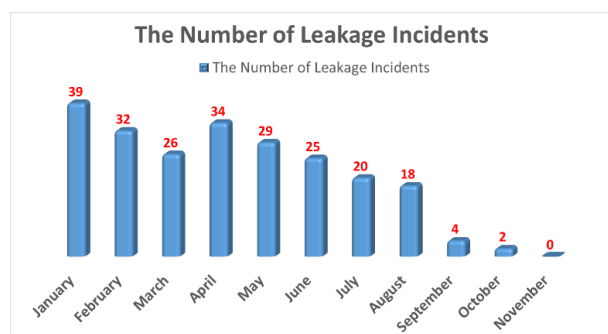


Figure 3. Methane Gas Leak Records in the Shipbuilding Projects (2024)

The flammability limits of methane gas depend on the physical and chemical properties of the gas. For example, the autoignition temperature (MIT) of methane is around 540 °C, at which temperature methane gas can combine with oxygen to undergo a combustion reaction [3]. Also, since methane gas has a lower density than air, it tends to rise in the air in the event of a leak. This can lead to methane gas accumulating in confined spaces and creating a potential explosion risk (Büyükkıdan et al., 2023). It is vital that the environment is ventilated and that the gas is safely exhausted in the event of a possible leak [4].

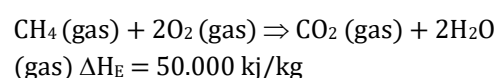
Table 1. The Statistics of Gas Hose Leakage in Shipbuilding Projects

Months	The Number of Leak Incidents	Leak Source	LEL (% v/v)
January	39	Torch Hose Connection	-
February	32	Torch Hose Connection	-
March	26	Gas hose joint	-
April	34	Gas hose joint	%10
May	29	Cutting Torch	-
June	25	Torch hose joint	-
July	20	Torch hose joint	-
August	18	Torch Hose Connection	-
September	4	Cutting Torch	-
October	2	Cutting Torch	-
November	0	Torch Hose Connection	-

Table 1 shows leakage statistics for approximately 126 closed areas of different volumes where gas measurements are taken every morning on a total of 4 LNG tankers in the Shipbuilding project. As a result of the gas measurement taken in the ballast tank number 5 (168 m³) on the port side of the NB-34 project in April 2024, methane gas reaching the lower explosion limit in the closed area was detected and the closed environment was cleared of gas by means of ex-proof fans by urgently activating gas-free protocols.

1.1. Explosible Parameters of Methane (CH₄) Gas

Methane gas, with the chemical formula CH₄ (carbon and 4 hydrogen atoms), is a colorless and odorless energy source that exists in the gas phase under normal conditions. It is an important fuel known as natural gas in the public language. One mole of methane burns in the presence of oxygen are producing one mole of carbon dioxide, two moles of water, and 50,000 kJ/kg of heat [5].



The lower (LEL) and upper (UEL) explosion limit ranges of methane gas are shown in Figure 3. The optimum explosion concentration is 95,000 ppm (meaning ≈ 10 kg methane gas for 169 m³ ballast tank)

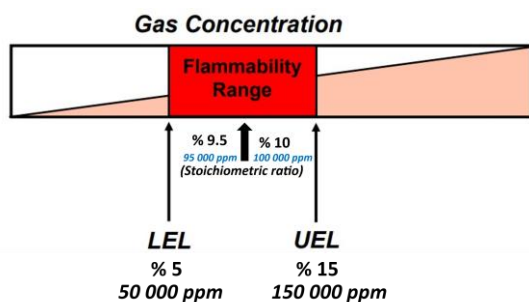


Figure 4. The Optimal Explosion Range of Methane Gas (LEL: 5 % UEL: 15 %)

$$\text{Specific gravity} = \lambda_{\text{metan}} = \frac{M_{\text{gas}}}{M_{\text{air}}} = \frac{16}{29} = 0,552 < \lambda_{\text{hava}}$$

(since the specific gravity of air is about 1, methane gas accumulates near the top). Methane gas (CH_4), which is a very safe gas under normal conditions, can cause very risky situations, especially after leaks that may occur in closed areas [6]. The physicochemical properties of methane gas are shared in Table 2.

Table 2. Physicochemical Properties of Methane Gas

Chemical Formula	CH_4
Molecular Weight	16.04 g/mol
Phase	Gas
Color	Colorless
Min. Ignition Temperature (MIT)	540 °C
Min. Ignition Energy (MIE)	0.28 μJ
Odour	Odourless
Gas Density (0°C, 1 atm)	0.717 kg/m^3
Melting Point	-182,5 °C
Boiling Point	-161,5 °C
Explosive Range	%5- %15 (v/v)
Flammability	Yes
Heat Value	55.5 MJ/kg
Polytropic Index, γ	1.3

II. MATERYAL VE METOD

This study is based on a truth gas leak near-miss incident. According to the study results, When approximately 10 kg of methane gas leaks (within 15 minutes for 80 % leak cross-section) into a 169 m^3 confined space, the ambient atmosphere reaches the most favorable explosion conditions (LEL %9,5 v/v). The stoichiometric volume fraction in the air is 9.5 % (v/v) for methane (CH_4) gas.

This stoichiometric ratio is equivalent to approximately 10 kg of methane gas for a confined space volume of 169 m^3 . Methane gas escaping from the leak cross-sectional area of approximately 80% of the hose diameter may create an explosive atmosphere (10 kg methane gas LEL 9.5 %v/v) in a confined space of 169 m^3 within 15 minutes.

The risk of confined space explosion discussed in this study occurred as a result of methane gas (CH_4) leakage at the connection point of the torch forgotten at the end of work at 08:00 p.m at the port side ballast tank number 5 in the NB-34 project (168 m^3) in April 2024 and, and the near-miss event where the stoichiometric air/ CH_4 concentration exceeded the lower explosion limit (55000 ppm) was scenarioed, and the answer to the question "What would be the consequences of an explosion that could occur in a closed area as a result of contact with an ignition source (due to static electricity, open flame, hot surfaces, sparks, etc.)" was investigated.

In the study, it was assumed that optimum stoichiometric conditions were provided by exceeding the lower explosion limit of methane (CH_4) gas (95000 ppm) and the effect of an explosion in a ballast tank caused by 10 kg of methane gas on a worker weight 70 kg was evaluated.

Determining the exit characteristic of the gas from the cross-sectional area is a very important parameter in terms of the mass flow rate (kg/s) of a gas expanding from the liquid phase volume to the gas phase volume. In order to make this decision, a critical pressure assessment must be made.

The relationship between the choked pressure and the gas source (tank, collector, cylinder, etc.) based on the isentropic expansion assumption, where P_o (Pascal) is the hose transfer pressure, is expressed by Equation 1.

$$P_c = P_a \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

In Equation 1, P_c refers to the critical pressure (Pascal), γ refers to the polytropic index ($1 < \gamma < 1.8$), and P_a refers to the atmospheric pressure. When $P_o > P_c$ the flow is considered sonic, when $P_o < P_c$ the flow is considered subsonic. If the critical pressure- P_c (pascal) is greater than the atmospheric pressure- P_a (101325 Pascal); $P_c > P_a$ the flow is expressed as sonic. In the literature, all flows at 1.9 bar and above are considered as sonic flows [8].

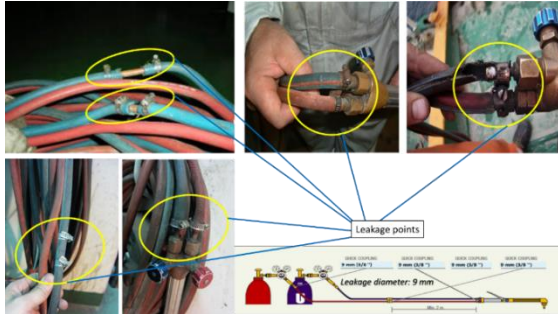


Figure 5. Leak points for flammable gases used oxy-cutting works in confined spaces

The fact that the methane gas escaping from the hose can be heard from approximately 8-10 meters indicates that the gas escaping from the hose into the enclosed space atmosphere is being emitted at sonic speed. The methodology discussed in the study can also be used with flammable gases used in other welding or oxy-cutting operations.

Equation 2 shows the mass flow equation for gas in a pressurized hose escaping from a cross-sectional area of the hose into the enclosed atmosphere.

$$\frac{dG}{dt} = C_D S P_o \psi \sqrt{\gamma \frac{M_{gas}}{Z R T} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma + 1/\gamma - 1}} \quad (2)$$

for sonic flow; $\psi = 1$

In Equation 2; dG/dt : mass flow rate of the gas exit at sonic speed (kg/s), C_D : (0.50 -1) discharge coefficient, S : cross-sectional area where the gas exits (m^2), P_o : process pressure of the gas (Pascal), ψ : dimensionless factor depending on the speed of the gas, γ : polytropic index ($1 < \gamma < 1.8$), M_{gas} : molecular weight of the gas (kg/kmol), R : universal gas constant (8314 J/kmol. K), T : temperature to which the gas is exposed (Kelvin). C_D (-) is a coefficient that takes into account that the process is not isentropic [9].

2.1. TNT (Tri Nitro Toluene) Equivalent Mass Method

The trinitrotoluene (TNT) equivalence method is a widely accepted concept for assessing the effects of explosions and is used in the related engineering field [10]. TNT is often used in equivalence calculations to measure the potency of other explosives. Other explosives are compared by "equivalent mass of TNT", usually expressed in terms of TNT. In this way; a consistent and understandable comparison can be made between the effects of various explosives. Many experiments and researches in the past have been

carried out specifically on TNT. Therefore, the results of such studies provide a reliable basis when applied to other explosives. As a result, the TNT equivalent is an important tool in evaluating other high-energy substances, making it easier for engineers and scientists to analyze different materials and enable them to develop safe applications [11].

$$M_{TNT} = \phi \times \frac{M_{gas} \times \Delta H_{gas}}{\Delta H_{TNT}} \quad (3)$$

In Equation 3, M_{TNT} represents the mass amount of TNT equivalent to the amount of explosive gas (kg), ϕ represents the explosion efficiency (0.01 – 0.10), ΔH_{gas} represents the explosion energy of the gas (kJ/kg), ΔH_{TNT} represents the explosion energy for explosive TNT (kJ/kg). CCPS (Center of Chemical Process Safety) recommends that an explosion efficiency of 0.03 be taken into account in hydrocarbon gas explosions.

2.2. Direct Effects of Explosion on Humans

The effect of blast waves on humans is based primarily on the sudden increase in pressure that occurs at the moment of explosion. These pressure waves can cause damage to various parts of the human body. Direct damage from pressure is usually concentrated in body parts that contain air pockets, such as the ears and lungs. In particular, the lungs are extremely sensitive to overpressure because of they contain air pockets. The overpressure wave created during an explosion can cause lung tissue to rupture or internal bleeding. The concept of scaled distance "Z" is a parameter used in the calculation of overpressure caused by explosions.

This concept was developed to better understand the effects of explosive charges and their impact on the surrounding air environment. Calculating overpressure (P_s) is of great importance in assessing the safety risks of such events and taking appropriate protective measures. Equation 4 helps to scale down the effects of larger explosive charges and compare the effects of smaller charges.

$$Z = R / W_{TNT}^{1/3} \text{ m.kg}^{-1/3} \quad (4)$$

$$0.3 \leq Z \leq 1.0 \text{ for;}$$

$$P_s = \frac{619.4}{Z} - \frac{32.6}{Z^2} + \frac{213.2}{Z^3}$$

$$\dot{P}_s = \frac{8P_s^2 + P_s 14 \times 10^5}{P_s + 7 \times 10^5} \quad (5)$$

In Equation 4; R represents the real distance (m), W: TNT equivalent mass amount (kg), Z: scaled distance (m.kg^{-1/3}), P_s: overpressure (kPa).

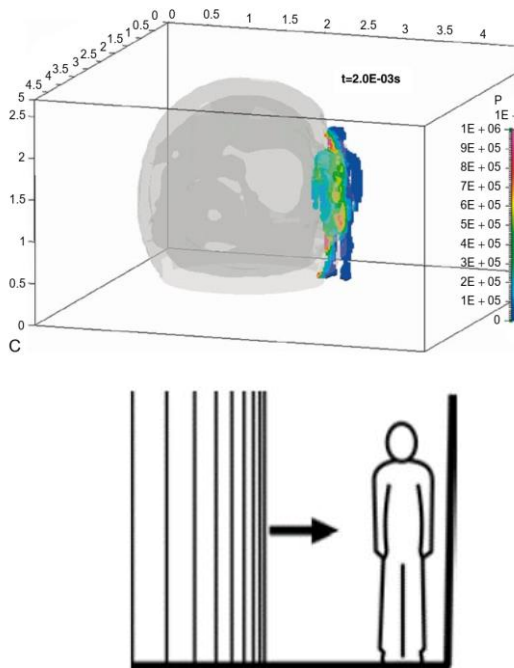


Figure 6. Effects of explosion overpressure wave on humans in confined space [13]

Figure 6 shows how an explosion in a closed space engulfs a person and the blast wave that the worker will be exposed to, using the Ansys-LS DYNA software. The position of people at the time of the explosion (e.g. sitting, standing or lying down) and environmental factors (e.g. confined space) may affect susceptibility to overpressure. Figure 6 shows the overpressure wave-body interactions that occur after a methane gas explosion in a confined space such as a ballast tank. The explosion overpressure wave occurring on humans can be calculated theoretically with equation 5.

2.3. Probit Functions

The overpressure that occurs during an explosion causes the pressure difference between the air inside the lungs and the outside environment to change suddenly. This can lead to tears or bleeding in the lung tissue. Due to the impact of the explosion, the body is suddenly exposed to a high external pressure, and this overpressure exposure makes it difficult for the lungs to expand, causing the air inside them to become compressed. These pressure differences caused by the high-intensity explosion can cause blood vessels to rupture, resulting in bleeding. Probit analysis, proposed by Eisenberg et al., is a statistical method used to estimate the risk of death from a particular event.

Based on the data obtained from equations 6, 7, 8, 9 the risk of death of individuals exposed to a certain overpressure is calculated.

$$Y = -5.0 + 5.74 \ln S \quad (6)$$

$$S = \frac{4.2}{\bar{P}} + \frac{1.3}{\bar{I}} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \frac{P_s}{P_a} \quad \text{and} \quad \bar{I} = \frac{i}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} \quad (8)$$

$$\bar{I} = \frac{i}{m^{1/3} \sqrt{P_a}} \left(\frac{1}{2} P_s' t_p \right)$$

$$P_r = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (9)$$

Blast pressure difference-induced lung injury usually occurs as a result of explosions that create high overpressure, and calculating such injuries is a complex process. The probability of death due to lung injury caused by the application of explosion pressure difference, Pr (%), can also be estimated theoretically by the following procedure [14]. According to the assumption in Figure 6; after an explosion caused by 10 kg of methane gas in the ballast tank, a worker standing 1 m away will be exposed to 1523 kPa of overpressure. When an evaluation is made with a 1 s positive phase duration, the mortality rate due to lung damage, one of the most important air-entering body organs, is estimated as 93%. This situation may have more dramatic consequences depending on the number of people in the ballast tank.

It was assumed that there was no ventilation in the environment and the explosion was analyzed for a 1 second positive phase duration based on the representation given in Figure 7.

- The physical formulas and parameters are used to calculate the overpressure; P_s (Pa) and death propability (Pr); at a given distance from the explosion center.
- The total overpressure P_s' (Pa) is calculated for the position of the human body in the confined space given in Figure 7.
- For a 70 kg human body, the scaled impulse (Pa^{1/2} s kg^{-1/3}) and the scaled pressure, $\bar{P}$ (-), are calculated by Equation 7.
- The probability of death is calculated with the Probit function (Pr) given in Equation 8.

It should be emphasized, however, that the results of these calculation procedures are not fully quantitative or binding.

2.4. Consequence Analysis Modeling Approach (CAMA) Method

Consequence analysis modelling approach (CAMA) is an important tool that comprehensively evaluates the situations and consequences that may cause a possible industrial accident in the chemical process industry and contributes to the planning of reinforcement and redevelopment works to eliminate the potential accident risk or reduce it to an acceptable level [7].

Usually, their purpose is primarily to estimate the effects and consequences of an event, so that contingency plans of hypothetical scenarios can be drawn, discussed and dealt with. The CAMA (Consequence Analysis Modeling Approach) given in Figure 7 was used in this study to evaluate the confined space explosion risk of methane gas. The framework of the study procedure is given in Figure 7. The Consequence Analysis Approach is defined as the estimation of the expected effects of event consequences, regardless of the frequency or probability of the expected event occurring (CCPS-Center for Chemical Process Safety).

The quantitative modeling approach applied for methane gas explosion in confined spaces in this study can be applied to different explosive gases in different industries. The key point is to construct integrity loss scenarios and predict their consequences.

The selection of the release case depends on the requirements of the consequence study. If an internal company study is being complete to determine the actual consequences of plant releases, then realistic cases should be selected such as this study.

Uncertainties that arise during the consequence modeling procedure are treated by assigning conservative values to some of these unknowns.

By doing so, a conservative estimate of the consequence is obtained, defining the limits of the design envelope. This ensures that the resulting engineering design to mitigate or remove the hazard is overdesigned. Every effort, however, should be made to achieve a result consistent with the demands of the problem.

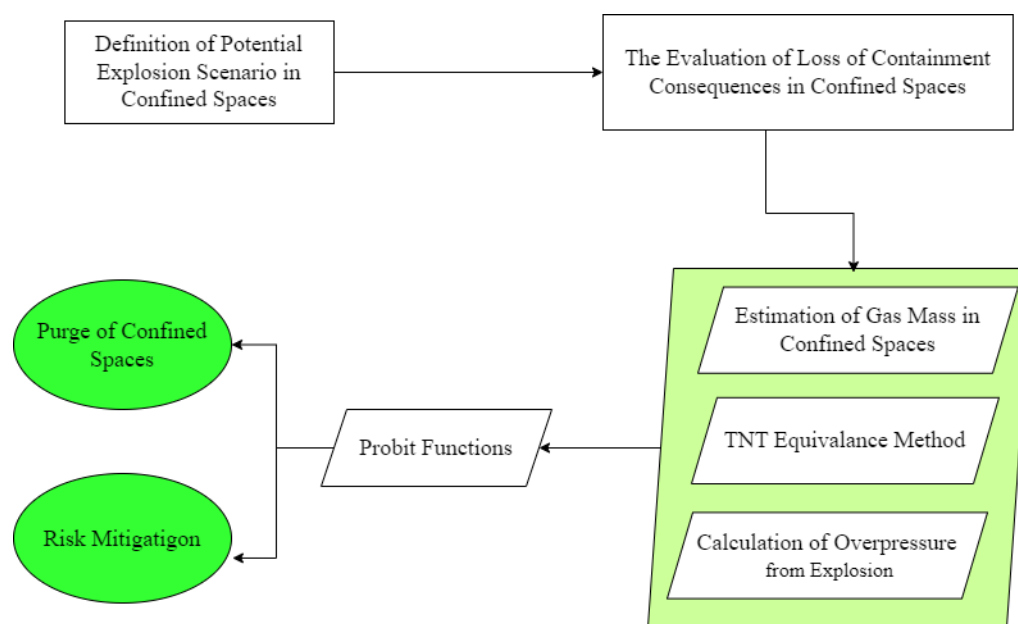


Figure 7. Study Framework [CAMA]

According to the study details given in Figure 7; an explosion scenario was created based on near-miss records, the stoichiometric methane gas amount was converted to TNT equivalent mass and the equivalent

overpressure was calculated. The obtained overpressure value was matched with probit functions and the probability of death of the worker in the ballast tank was estimated.

III. RESULTS and DISCUSSION

According to the consequence analysis evaluation; the explosion mass of 10 kg methane gas may be fatal in 169 m³ confined space. When this amount of methane gas accumulated in a confined space explodes under the influence of an ignition source, it creates an overpressure of approximately 1523 kPa on the worker at a distance of 1 meter.

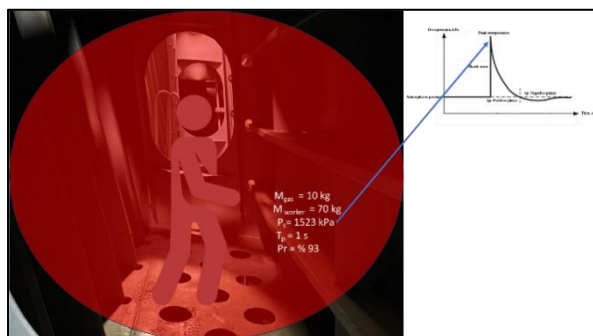


Figure 8. Possibility of Death Due to Overpressure in Ballast Tank

The findings obtained in this study are very important in terms of emphasizing why flammable gas leaks that may occur from welding gas hoses should be prevented. It is scientific evidence that demonstrates the importance of the risk for employers. The findings obtained through the CAMA were a driving force in eliminating the risk of gas leaks occurring in the confined spaces between January 2024 and November 2024. Although the resulting overpressure value varies according to different calculations, the occurrence of fatal consequences is an indisputable fact.

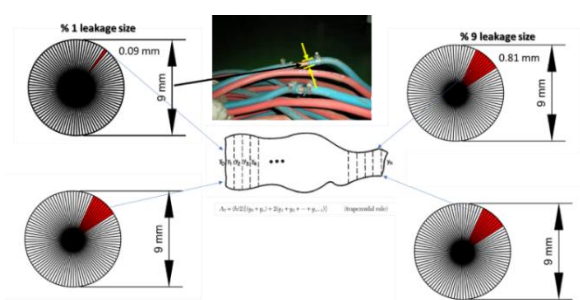


Figure 9. Non-regular Leakage Cross-section on Gas Hoses

The majority of leaks that may occur in gas hoses do not occur in smooth cross-sectional areas. For irregular leak holes, the “trapezoidal rule” can be applied [15]. Although assumptions made based on hose diameter for leaks make it difficult to estimate the amount of leaked gas, it will help us have an idea about the risks

of gas leaks that may occur at between 1% and 100% of the hose diameter (Figure 9).

In the literature, the studies on methane gas explosion experiments in confined spaces show that the most favorable conditions are 9.5% (95000 ppm). [16]. For this reason, the reference was taken as 10 kg explosive gas mass, which is the equivalent of the explosion in the 169 m³ ballast tank in the scenario.

The explosive methane gas concentration in a 169 m³ confined space (ballast tank) was approximately 10 kg mass, and the methane gas leak of 80% of the hose cross-section diameter reached an explosive concentration in approximately 15 minutes. The amount of 10 kg of methane gas leaking into the 169 m³ confined space was equivalent to the 95000 ppm (9.5% v/v) methane gas concentration required to provide optimum explosion conditions.

Explosion accidents (Figure 1), which are one of the main causes of fatal occupational accidents in the shipbuilding industry, are a problem that should be given serious consideration, especially when evaluated in terms of confined spaces.

In this study, the effects of possible methane gas explosions in confined spaces on workers were investigated using the QRA method. As is known, the explosion phenomenon is far from the field of experimentation and observation due to the risks it involves. Therefore, This theoretical study provides an important perspective to theoretically reveal the risk of confined space gas leakage, which is frequently encountered in the shipbuilding industry.

- It is important that the hoses used in closed areas comply with the TS EN 3821 standard in order to prevent the fluid from damaging the hose and causing leakage as a result of deformation.
- Gas purification measurements must be well disciplined before entering the closed area, and closed areas containing gas must be exhausted with ex-proof fans.
- Combustible gas hoses and oxygen cutting torches should be checked regularly.
- During the shipbuilding phase, it is necessary to establish a technological infrastructure to continuously monitor flammable and toxic gas concentrations in closed areas (ballast tanks, cargo tanks, void spaces, cofferdams, bow thrusters, settling tanks, service tanks, etc.), which are quite numerous.

Additionally, attached hose connections should not be allowed in closed areas, and in cases where attachment is necessary, double clamps should be used on both sides.

Future work will focus on experimental and theoretical purge times, positioning of fan suction points and appropriate fan designs for ballast tanks containing flammable gas.

IV. CONCLUSION

Eliminating methane gas leaks, which cause serious losses in terms of explosion risk in confined spaces, is a very important action. A possible methane gas explosion in a confined space can have fatal consequences. Therefore, confined space gas leaks must be continuously monitored and effective purge systems must be used.

ACKNOWLEDGEMENT

This study is evidence for explaining the risk in question to subcontractors with scientific methods and was supported by the top management of İÇDAŞ Değirmencik Shipyard / ship building department.

REFERENCES

- [1] Izci, F. B., Gökyay, O., & Barlas, B. (2024). Investigation of non-fatal occupational accidents and their causes in Turkish shipyards. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 30(1), 33-40.
- [2] Kravtsov, A. N., Zdebski, J., Svoboda, P., & Pospichal, V. (2015, May). Numerical analysis of explosion to deflagration process due to methane gas explosion in underground structures. In *International Conference on Military Technologies (ICMT) 2015* (pp. 1-9). IEEE.
- [3] Chen, H. (2015). *Gas explosion technology and biomass refinery* (No. 11551). Springer Netherlands.
- [4] Garrison, R. P., & McFEE, D. R. (1986). Confined Spaces—A Case for Ventilation. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(11), A-708.
- [5] Green, D. W. (2008). Perry's chemical engineers'. *Handbook—seventh Edition—Sections*, 5-12.
- [6] De Santoli, L., Paiolo, R., & Basso, G. L. (2017). An overview on safety issues related to hydrogen and methane blend applications in domestic and industrial use. *Energy Procedia*, 126, 297-304.
- [7] Han, Z. Y., & Weng, W. G. (2011). Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of hazardous materials*, 189(1-2), 509-518.
- [8] Mercedes G.M., Munoz M., Casal J. (2010) Radiant heat from propane jet fires, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34, 323-339.
- [9] Miranda, J. T., Camacho, E. M., Formoso, J. F., & García, J. D. D. R. (2013). Comparative study of the methodologies based on Standard UNE 60079/10/1 and computational fluid dynamics (CFD) to determine zonal reach of gas-generated Atex explosive atmospheres. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26(4), 839-850.
- [10] Kwon, S., & Park, J. C. (2015). A review of TNT equivalent method for evaluating explosion energy due to gas explosion. *Explosives and Blasting*, 33(3), 1-13.
- [11] Assael, M. J., & Kakosimos, K. E. (2010). *Fires, explosions, and toxic gas dispersions: effects calculation and risk analysis*. CRC Press.
- [12] Finlay, S. E., Earby, M., Baker, D. J., & Murray, V. S. (2012). Explosions and human health: the long-term effects of blast injury. *Prehospital and disaster medicine*, 27(4), 385-391.
- [13] Lees, F. (2012). *Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*. Butterworth-Heinemann.
- [14] Wightman, J. M., & Gladish, S. L. (2001). Explosions and blast injuries. *Annals of emergency medicine*, 37(6), 664-678.
- [15] Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2001). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Pearson Education.
- [16] Yue, C., Chen, L., Li, Z., Mao, Y., & Yao, X. (2023). Experimental study on gas explosions of methane-air mixtures in a full-scale residence building. *Fuel*, 353, 129166.

İşe Bağlı Stres, Tükenmişlik ve İş Tatmininin İş Güvenliği Uzmanlarına Etkisi: YEM ve Yol Analizi Yöntemlerinin Kullanılması

The Effects of Work-Related Stress, Burnout and Job Satisfaction on Occupational Safety Specialists: Using SEM and Path Analysis Methods

Ahmet Ebrar SAKALLI ¹, Sertaç TEMUR ², Zeynep Feride OLCAY ³

¹*İstanbul Medipol Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34810, İstanbul, Türkiye*

²*Üsküdar Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34672, İstanbul, Türkiye*

³*İstanbul Aydın Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, 34295, İstanbul, Türkiye*

Öz

Türkiye, Avrupa'da ölümlü iş kazalarında ilk sıralarda yer almaktadır. Yüksek riskli sektörle ilgili bir araştırmaya göre, iş güvenliği uzmanlarının çalışanların güvenliğinin denetlenmesinde kilit bir role sahip olduğu belirtilmektedir. Bu çalışmanın amacı, iş güvenliği uzmanları arasında işle ilgili stres ve tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisini incelemektir. Bu çalışmada, yapısal eşitlik modellemesi ve yol analizi bu konuda ilk kez kullanılmıştır. 185 iş güvenliği uzmanı, sosyodemografik veriler ile iş stresi, tükenmişlik ve iş tatmini ile ilgili spesifik ölçekleri içeren bir web anketini doldurmuştur. Analiz sonuçları, stresin tükenmişlik üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermiştir. Buna karşın, duyarsızlaşma ve duygusal tükenme yoluyla iş tatminini önemli ölçüde olumsuz etkilemektedir. Buna ek olarak, iş güvenliği teknikerlerinin B sınıfı iş güvenliği uzmanlarına kıyasla işle ilgili stres yaşama olasılıklarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu pilot çalışma sonucunda, iş güvenliği uzmanları ve teknikerleri açısından bakıldığında, kişi başına düşen gelirin azalmasını iş stresi ile birlikte düşündüğümüzde işyerlerindeki sorumluluklarını gerektiği gibi yerine getiremeyecekleri öngörülmektedir. Bu nedenle Türkiye'de ilk kez gerçekleştirilen bu ölçekli çalışma, bundan sonra yapılacak çalışmalara örnek teşkil etmekte ve geliştirilerek iş güvenliği uzmanları ve teknikerlerine daha iyi koşullar sağlanmasında öncü olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İş Güvenliği Uzmanı, Tükenmişlik, İş Tatmini, Yapısal Eşitlik Modellemesi, İş Sağlığı ve Güvenliği

Abstract

Turkiye ranks first in Europe in fatal work accidents. According to a study on the high-risk sectors, occupational safety specialists have a key role in overseeing the safety of workers. The purpose of this pilot study is to examine the impact of work-related stress and burnout on job satisfaction among occupational safety specialists. In this study, structural equation modelling and path analysis were to be used for the first time ever on this subject. 185 occupational safety specialist completed a web questionnaire that included sociodemographic data and specific scales related to job stress, burnout and job satisfaction. The results of the analysis showed that stress has positive effects on burnout. In contrast, it significantly negatively affects job satisfaction through depersonalization and emotional exhaustion. In addition, occupational safety technicians are more likely to experience work-related stress compared to class B occupational safety specialists. As a result of the study, from the perspective of occupational safety specialists and technicians, it is predicted that they will not be able to fulfill their responsibilities in their workplaces properly when we consider the decrease in per capita income together with job stress. Therefore, this scale study, which was conducted for the first time in Turkey, sets an example for future studies and pioneers the development of better conditions for occupational safety specialists and technicians.

Keywords: Occupational Safety Specialist, Burnout, Job Satisfaction, Structural Equation Modelling, Occupational Health and Safety

I. GİRİŞ

İş kazaları, modern çalışma hayatının kaçınılmaz sorunlarından biri olarak hem çalışanların güvenliğini tehdit etmekte hem de işletmelerin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Türkiye, ölümlü iş kazalarında Avrupa'da üst sıralarda yer almakta [1, 2] ve bu durum, iş sağlığı ve güvenliği süreçlerinin önemini daha da ön plana çıkarmaktadır. İş güvenliği uzmanları, bu süreçlerin merkezinde yer alarak çalışanların güvenliğini sağlamak ve kazaların önlenmesi adına kritik bir rol üstlenmektedir. İSG Katip verilerine göre Türkiye'de 75.000'den fazla iş güvenliği uzmanı görev yapmaktadır [3]. Bununla birlikte Amerika Birleşik Devletleri'nde İş İstatistikleri Bürosu verilerine göre 153.500 İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı ve Teknikeri bulunmaktadır [4]. Ancak bu uzmanların mesleki rollerini yerine getirirken karşılaştıkları stres faktörleri, yalnızca bireysel sağlıklarını değil, aynı zamanda iş tatmini ve mesleki başarılarını da etkilemektedir [5].

Psikososyal risk faktörleri, iş sağlığı ve güvenliği alanında giderek daha fazla dikkat çekmekte ve uzmanların işe bağlı stres, tükenmişlik ve iş tatmini düzeylerini etkileyen önemli unsurlar arasında yer almaktadır. Literatürde, bu faktörlerin çalışanların performansı üzerindeki etkileri sıkça ele alınsa da iş güvenliği uzmanları özelinde yapılan çalışmaların sayısı sınırlıdır. Bu durum, özellikle yüksek riskli sektörlerde görev yapan uzmanların çalışma koşullarını, rol belirsizlikleri ve rol çatışmaları kaynaklı karşılaştıkları zorlukları anlamayı güçleştirmektedir [6].

İş güvenliği uzmanları, yüksek stres altında çalışan ve mesleklerinin doğası gereği psikososyal risk faktörlerine sıkça maruz kalan bir meslek grubudur. Ancak, iş stresi ve tükenmişliğin bu profesyoneller üzerindeki etkilerini değerlendiren kapsamlı bir analiz bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, iş güvenliği uzmanlarının iş stresi, tükenmişlik ve iş tatmini arasındaki ilişkisi ele alınmaktadır. İş güvenliği uzmanlarının, meslekleri gereği yüksek düzeyde stresle karşı karşıya kaldıkları ve bunun mesleki tatminleri ile tükenmişlik düzeyleri üzerinde etkili olduğu öne sürülmektedir.

Bu çalışma, İstanbul sınırları içerisinde çalışan iş güvenliği uzmanlarının iş ortamındaki psikososyal risklerini anlamak, bu faktörlerin iş tatminlerine etkisini ortaya koymak ve elde edilecek sonuçlarla birlikte iş güvenliği politikalarının geliştirilmesine nasıl katkı sağlayacağı ve iş güvenliği uzmanları üzerine yapılacak çalışmalara ışık tutmayı hedeflemektedir.

1.1. İşe Bağlı Stres

Stres, kişinin çevresindeki uygunsuz fiziksel ve sosyolojik koşullar nedeniyle sınırlarının ötesinde

harcadığı fizyolojik ve psikolojik çaba olarak tanımlanmaktadır [7]. Lazarus [8] stresin, kişinin olayların gidişatına ilişkin değerlendirmesine bağlı olarak kişiden kişiye değişebileceğini savunmaktadır.

İşyeri ortamından kaynaklanan stres, işe bağlı stres olarak tanımlanmaktadır. İşe bağlı stres konusu, son yıllarda iş sağlığı ve güvenliğinin en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir [9].

ABD'li işverenler işle ilgili stres nedeniyle yılda 200 milyar dolara mal olmaktadır. İş sağlığı ve güvenliği sorunlarına yol açar ve önemli bir ekonomik kayıp nedenidir [10].

1.2. Tükenmişlik

Tükenmişlik, strese neden olan kaynaklara uzun süre maruz kalmaya verilen bir tepkidir [11]. Tükenmişlik sendromunun en önemli belirtisi, bireylerin iş yaşamlarında kendilerini verimsiz, mutsuz ve tatminsiz hissetmeleri gibi giderek artan duygusal tükenmedir [12]. Tükenmişlik, iş stresine karşı gösterilen psikolojik tepki olarak tanımlanır ve duygusal tükenme, duyarsızlaşma ve kişisel başarıda azalma ile karakterize edilir [13].

Araştırmacılar mesleki tükenmişliği, yüksek kronik iş stresinin nedeni ve bitkinlik, kinizm ve düşük mesleki aktivite ile karakterize edilen psikolojik bir sendrom olarak tanımlamaktadır [14]. Bu sağlık sorunlarına ek olarak, mesleki tükenmişliğin İSG üzerinde de olumsuz etkileri vardır. Son yıllarda yapılan çalışmalar, tükenmişliğin çalışanların tehlikelere karşı dikkatini azalttığını ve bu nedenle çok daha fazla iş kazasına neden olduğunu göstermiştir [15, 16, 17]. Ayrıca, tükenmişliğin çalışma ortamında yönetim ihmali [17] ve yöneticilerin yetersiz güvenlik önlemleri [18] gibi güvensiz davranışları teşvik edebileceği görülmektedir [19]. Dolayısıyla, bu güvensiz davranışlar meydana gelecek kazaların belirleyici faktörüdür [20, 21].

Maslach'ın tükenmişlik modellemesinde duygusal tükenmişlik, duyarsızlaşma ve kişisel başarı olmak üzere üç boyuttan oluşmaktadır [22]. Duygusal tükenme boyutu başlangıç ve en önemli bileşen olarak tanımlanmaktadır [23, 24]. Duygusal tükenme, kişi duygusal kaynaklarının tükendiğini hissettiğinde ortaya çıkar. Bu kişiler kendilerini yorgun, yıpranmış ve enerjileri tükenmiş hissederler. Ayrıca, çözüm bulma konusunda kendilerini yetersiz hissederler ve insan ilişkilerinden uzaklaşırlar. İnsanları zihinlerinde kategorize ederler ve tanıştıkları insanlara karşı kalıplaşmış davranışlar sergilerler [25]. Çevresine karşı duyarsızlaşan, hizmet verdiği kişilere karşı duyarsız davranan ve onları nesneleştiren, çıkarıcı olmakla suçlayan, onlara karşı olumsuz ve hırçın bir tutum içinde olan çalışanlar, insanlarla ilişkilerini en aza indirirler [12]. Çalışanın olumsuz düşüncelerinin ve çevresindekilere karşı duyarsızlığının da çalışanın başarısını etkilediği, özgüven kaybına yol açtığı

görülmektedir. Bu aynı zamanda kişinin öz saygısına da zarar verir [25].

1.3. İş Tatmini

İş tatmini, çıktıların -çalışanın işteki kayıpları- ve girdilerin -çalışanın işteki kazançları- dengeli durumu olarak tanımlanır. Çalışan bu girdiler ve çıktılar arasında bir karşılaştırma yapar ve eğer kişinin kuruma katkısı -girdiler-, kurumun kendisine katkısından -çıktılar- çok daha yüksekse, o zaman tatminsizlik olgusu ortaya çıkar [22].

İçsel ve dışsal iş tatmini olarak ikiye ayrılır. İçsel iş tatmini; başarı, takdir edilme, iş ve işin sorumluluğu, terfi nedeniyle yeniden atanma gibi işin içsel niteliklerine ilişkin tatmin faktörlerinden oluşurken, dışsal iş tatmini; işletme politikası ve yönetimi, denetim şekli, yönetici, iş ve ast iletişimi, çalışma koşulları, ücret gibi işin çevresel kısmına ilişkin faktörlerden oluşmaktadır. [26].

Düşük iş tatmini seviyesi, çalışanların kurumdan ayrılma niyetini [22, 27] ve işe devamsızlıklarındaki artışı güçlü bir şekilde öngörmektedir [28].

1.4. Çalışmanın Amacı

Türkiye, Avrupa'daki ölümlü iş kazalarında ilk sıralarda yer almaktadır [1]. Yüksek riskli sektöre ilişkin bir araştırmaya göre, iş güvenliği uzmanlarının çalışanların güvenliğinin denetlenmesinde kilit bir role sahip olduğu belirtilmektedir [29] İş Güvenliği Çalışanlarının (İŞÇ) önemi nedeniyle psikososyal değerlendirmelerin yapılması oldukça önemlidir, ancak Türkiye'de ve dünyada İŞÇ ile ilgili çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışmada, iş güvenliği çalışanları arasında işe bağlı stres, tükenmişlik ve iş tatmininin ölçülmesi amaçlanmıştır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Örneklem

İstanbul'da iş güvenliği uzmanlarının görev, yetki, sorumluluk ve eğitimleri hakkında yönetmeliğe göre iş güvenliği uzmanları üç sınıfa ayrılıyor. (C) sınıfı belgeye sahip olanlar az tehlikeli sınıflarda, (B) sınıfı belgeye sahip olanlar az tehlikeli ve tehlikeli sınıflarda, (A) sınıfı belgeye sahip olanlar ise tüm tehlike sınıflarındaki işyerlerinde çalışabiliyor [30]. İş güvenliği uzmanının, iş sağlığı ve güvenliği alanında görev yapmak üzere Bakanlıkça yetkilendirilmiş, iş güvenliği uzmanlığı belgesine sahip, mühendislik ve mimarlık fakültesi mezunu kişiler olabileceği 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nda tanımlanmıştır. [31].

Bu çalışmada veri toplama yöntemi olarak Google Forms kullanılmış olup, katılımcılar gönüllülük esasına göre belirlenmiştir. İstanbul sınırları içerisinde yaşayan İGU (İş Güvenliği Uzmanı) ve İGT (İş Güvenliği

Teknikeri) rastgele seçilerek 185 İGU'ya uygulanmıştır.

Bu çalışmada örneklem büyüklüğü belirlenirken Anderson & Gerbing [32] tarafından önerilen yapısal eşitlik modellemesi (YEM) için gerekli minimum 150 örneklem ölçütü dikkate alınmıştır. 185 kişilik örneklem, istatistiksel analizlerin güvenilir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır. Evren büyüklüğü göz önüne alındığında belirli sınırlılıklar içerse de, elde edilen bulgular iş güvenliği uzmanlarının iş stresi, tükenmişlik ve iş tatmini ilişkisini değerlendirmek açısından anlamlı ve güvenilir bir çerçeve sunmaktadır.

2.2. Ölçekler

Anket şunları içermektedir: 1) genel, sosyodemografik bir anket; 2) [33] tarafından uyarlanan işe bağlı stres ölçeği, 3) uyarlanmış Maslach Tükenmişlik Ölçeği; 4) uyarlanmış Minnesota İş Tatmini Ölçeği.

2.3. İşe Bağlı Stres Ölçeği

İşe bağlı stresin değerlendirilmesi için House ve Rizzo [33] tarafından geliştirilen ve Efeoglu [34] tarafından Türkçe uyarlaması yapılan işe bağlı stres ölçeği kullanılmıştır. Cevapların 5'li Likert (örn. 1: "kesinlikle katılmıyorum", 5: "kesinlikle katılıyorum") üzerinden değerlendirildiği ölçek yedi sorudan oluşmaktadır. Bu çalışma için Cronbach's Alpha Güvenilirlik Katsayısı 0,92 olarak bulunmuştur.

2.4. Maslach Tükenmişlik Ölçeği

Maslach Tükenmişlik Ölçeği [35] tarafından Türkçeye uyarlanmıştır. Maslach Tükenmişlik Ölçeği 22 ifadeden oluşmakta ve tükenmişliği üç boyut üzerinden gözlemlemektedir. Bunlardan biri 9 ifade içeren duygusal tükenme, ikincisi 5 ifade içeren duyarsızlaşma ve sonuncusu 8 ifade içeren kişisel başarı alt boyutudur. Ve 5'li Likert puan ölçeğidir (0: Hiçbir zaman, 4: Her zaman) Sonucun yorumlanmasını kolaylaştırmak için kişisel başarı yerine kişisel başarı eksikliği ifadesinin kullanılması tercih edilmektedir [36]. Ölçeğin kişisel başarı alt boyutu ters kodlanmıştır [37]. Bu çalışma için Cronbach's Alpha Güvenilirlik Katsayıları .72, .75 ve .92 olarak bulunmuştur.

2.5. Minnesota İş Doyum Ölçeği

Minnesota İş Doyum Ölçeği, genel doyum düzeyinin altında, içsel ve dışsal doyum olmak üzere iki alt boyutlu olarak ifade edilmiştir [38]. Bu ölçek 5'li Likert tipi ölçek türünde oluşturulmuş 20 faktör ile ifade edilmektedir. Ölçek puanlamasında Kesinlikle Katılmıyorum için 1 puan, Kesinlikle Katılıyorum için 5 puan şeklinde değerlendirilmiştir. Ölçeğin değerlendirilmesinde sonuçların yüksek olması, iş memnuniyetinin de yüksek olduğunu göstermektedir. [39]. Bu çalışma için Cronbach's Alpha Güvenilirlik Katsayısı 0.92 olarak bulunmuştur.

2.6. Verinin Analizi

Betimsel analiz teknikleri ve yapısal eşitlik modellemesi (YEM) kullanılmıştır. Tanımlayıcı analiz için SPSS v25 programı, YEM, yol analizi ve moderatör regresyon analizi için ise AMOS v21 programı kullanılmıştır.

YEM, gözlenen ve gizli değişkenler arasındaki ilişkileri açıklamak ve hipotezleri test etmek için kapsamlı bir istatistiksel yaklaşım sunmaktadır. YEM diğer yaklaşımlara (korelasyon, çoklu regresyon ve ANOVA gibi) göre daha esnek ve kapsamlıdır [40].

YEM birden fazla regresyon analizinin toplamı olarak görülse de saha çalışmalarında nedensellik analizi, yapısal regresyon analizi, kovaryans yapı analizi ve yol analizi gibi tanımlamalar da yapılmıştır [41, 42].

İkinci nesil gelişmiş bir istatistiksel analiz olan YEM, selefi olan birinci nesil analizlere kıyasla birçok avantaja sahiptir. YEM, çoklu regresyon analizini tek bir modelde sunarak araştırmacının hataya daha az açık olduğunu gösterir [43]. Bir ölçüm için ayrı ayrı regresyon analizi yapılması hata payını artıracaktır. Bu hata payının artması ikinci tip hataya neden olacaktır.

Yol analizi, gözlenen (ölçülen) değişkenler arasındaki ilişki ağlarını inceleyen bir analizdir [44]. Yol analizinin amacı, değişkenler arasında olduğu varsayılan ilişkinin önemini ve büyüklüğünü tahmin ederek çıkarımlarda bulunmaktır. Yol analizi diğer analiz türlerine göre daha karmaşık modelleri analiz etmek için daha uygundur çünkü hem doğrudan hem de dolaylı etkiler incelenebilir ve modeller oluşturmak için faktörler arasındaki çoklu ilişkiler aynı anda analiz edilebilir (Kim et al., 2021). Standartlaştırılmış yol katsayısı için şu değerler söylenebilir: yaklaşık 0,10 düşük etki, yaklaşık 0,30 orta etki ve 0,50'den yüksek katsayı değerleri yüksek etki olarak ifade edilebilir [46].

Moderatör değişken, bağımsız değişken ile bağımlı değişken arasındaki ilişkinin gücünü veya yönünü etkileyen değişken olarak tanımlanır [47]. Başka bir deyişle, moderatör değişken bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi artırabilir, azaltabilir veya yönünü değiştirebilir. Tablo 2'deki değişkenlerin her biri bu çalışmada moderatör değişken olarak kullanılmıştır. Ancak analiz, bunlardan sadece ikisinin anlamlı olduğunu göstermiştir.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

3.1. Demografik Bilgiler

Araştırmaya katılanların demografik bilgileri tablo 1'de yer almaktadır. Ölçekler katılımcılarla paylaşılmadan önce etik onay alınmıştır. Buna göre araştırmaya katılanların 112'si (%60,5) erkek, 73'ü (%39,5) kadın katılımcılardan oluşmaktadır. Diğer fakültelerden mezun olanlar, mühendislik ve mimarlık fakültesi ile fen edebiyat fakültesinin kimya, fizik ve biyoloji

bölümlerinden mezun olduklarını ifade etmektedir. Ayrıca, katılımcıların yaşı, aylık geliri, lisans derecesi, çocuk sahibi olma durumu, mevcut mesleği kaç yıldır sürdürdüğü, çalışma şekli, iş güvenliği uzmanlığı derecesi gibi değişkenler de tablo 1'de tanımlanmıştır.

Tablo 1. Demografik Bilgiler

Değer		Sayı (N=185)	%
Cinsiyet	Erkek	112	60.5
	Kadın	73	39.5
Yaş	18-25	51	27.5
	26-33	61	33.0
	34-41	39	21.1
	42-49	24	13.0
	50+	10	5.4
Aylık Gelir	3000₺'den az	31	16.8
	3001₺-4000₺	69	37.3
	4001₺-5000₺	33	17.8
	5001₺-6000₺	11	5.9
	6000₺'den fazla	41	22.2
Hangi lisans bölümünden mezunsun?	İSG Önlisans	81	43.8
	İSG Lisans	22	11.9
	Diğer Fakülteler	82	44.3
Medeni Durum	Evli	83	44.9
	Bekar	102	55.1
Çocuk sahibi olma	Evet	71	38.4
	Hayır	114	61.6
Şu anki işinizde kaç yıldır çalışıyorsunuz?	1 yıldan az	57	30.8
	1-3 yıl arası	50	27.0
	3-5 yıl arası	28	15.2
	5 yıldan fazla	50	27.0
Kaç yıldır şu anda çalıştığınız firmada çalışıyorsunuz?	1 yıldan az	30	16.2
	1-4 yıl arası	56	30.3
	4-7 yıl arası	52	28.1
	7 yıldan fazla	47	25.4
Çalışma çeşidi	Ortak Sağlık ve Güvenlik Birimi'nde (OSGB) çalışmaktayım.	81	43.8
	Bir firmada çalışmaktayım.	104	56.2
İş Güvenliği Uzmanlık Sınıfınız	A Sınıfı	18	9.7
	B Sınıfı	76	41.1
	C Sınıfı	64	34.6
	Tekniker	27	14.6

Tablo 2. Tanımlayıcı İstatistikler

	N	Minimu m	Maksim um	Ortan ca	Standa rt Sapma
İş Doyumu	185	1.00	4.80	3.3276	.70385
Tükenmişlik	185	.37	3.08	1.3719	.56569
Stres	185	1.00	5.00	3.3098	.93342
Değer N	185				

Tablo 2'de iş tatmini, tükenmişlik ve mesleki stresin maksimum, minimum, medyan ve standart sapma değerleri gibi bilgiler yer almaktadır. İş tatmini ve stres ölçekleri için en az 1, en fazla 5 puan, tükenmişlik ölçeği için ise en az 0, en fazla 4 puan alınabileceği ifade edilmektedir. Ortanca puanlar incelendiğinde iş tatmininin 3,32, tükenmişliğin 1,37 ve stresin 3,30 olduğu görülmektedir.

Tablo 3. Ölçekler Arası Korelasyon Katsayıları

		İçsel Doyum	Dışsal Doyum	Stres	Duyusal Tükenmişlik	Duyarsızlaşma	Kişisel Başarı
İçsel Doyum	Pearson Korelasyon	1	0,733*	-,482**	-,603**	-,365*	-,476**
	Sig. (2-tailed)		,000	,000	,000	,000	,000
Dışsal Doyum	Pearson Korelasyon	,733*	1	-,557**	-,634**	-,305*	-,244**
	Sig. (2-tailed)	,000		,000	,000	,000	,001
Stres	Pearson Korelasyon	-,482**	-,557**	1	,751*	,559**	,112
	Sig. (2-tailed)	,000	,000		,000	,000	,129
Duyusal Tükenmişlik	Pearson Korelasyon	-,603**	-,634**	,751*	1	,668**	,245*
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000		,000	,001
Duyarsızlaşma	Pearson Korelasyon	-,365*	-,305*	,559**	,668**	1	,211*
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000		,004
Kişisel Başarı	Pearson Korelasyon	-,476**	-,244**	,112	,245*	,211**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,001	,129	,001	,004	

** . Korelasyon 0,01 düzeyinde anlamlıdır

Tablo 3'e bakıldığında, kişisel başarı ve stres dışında tüm ölçekler arasında anlamlı bir korelasyon olduğu görülmektedir. Ayrıca, stres ve tükenmişlik alt ölçeklerinin iş tatmini alt ölçekleri ile negatif yönde anlamlı korelasyona sahip olduğu görülmektedir.

Çok değişkenli (Mardia's Coefficient) sütununda basıklık ve kritik oran değerleri kullanılmıştır. Burada en önemli olan kritik oran değeridir, çünkü bu değer çok değişkenli basıklığın normalleştirilmiş tahmini olan z değeridir. Tablo incelendiğinde verilerin normal dağıldığı, kritik oran değerinin 4,48 ve belirtilen aralıkta olduğu görülmektedir.

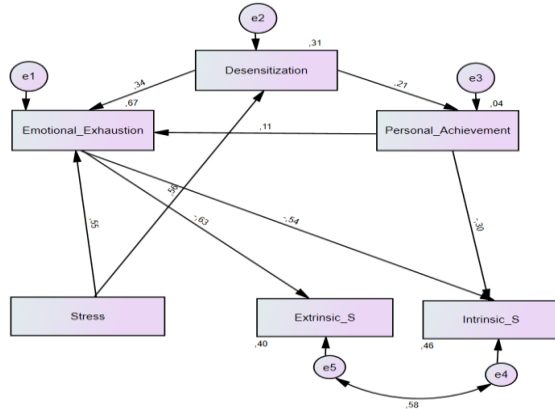
3.2. Yol Analizi

Doygun model, modeldeki tüm yollara sahip olmak için maksimum sayıda parametre ile oluşturulan bir modeldir. Bağımsız model, modelde yolların olmamasıdır, yani gözlenen değişkenler arasında sıfır korelasyon vardır [48].

Tablo 4. Uyum Kriterleri ve Yol Analizi İndeksleri Tabloları

Model	P	χ^2/DF	SRMR	GFI	BI	CFI
Temel model	9.73	3.29	0.041	0.97	0.98034	0.98
Doymuş model					109.63	
Bağımsız model					618.47	

Tablo 4 incelendiğinde, ki-kare değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu, ancak ki-kare serbestlik derecesinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı görülmektedir ($\chi^2 / sd \leq 3$). Bu nedenle, ki-kare serbestlik derecesinin incelenmesinin ancak örneklem 200'den fazla olduğunda daha iyi sonuçlar verebileceğinden daha önce bahsetmiştik. Diğer katsayı endekslerine bakıldığında hepsinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ve modelin iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Örneklem büyüklüğü 185 olmasına rağmen ki-kare istatistikleri ve ki-kare serbestlik dereceleri de incelenmiştir.



Şekil 1. Modelin Yol Analizi Gösterimi

(Not: *Extrinsic_S*: Dışsal memnuniyet, *Intrinsic_S*: İçsel memnuniyet; *Desensitization*: Duyarsızlaşma; *Personal Achievement*: Bireysel Başarı; *Emotional Exhaustion*: Duygusal Tükenmişlik; *Stress*: Stres)

Bu bilgiler ışığında tasarlanan modelin standardize edilmiş yol katsayısı incelendiğinde modelin yüksek etkilerle ifade edilen bir model olduğu görülmektedir. Şekil 1'deki standardize edilmiş regresyon katsayısına bakıldığında içsel tatmin ile dışsal tatmin arasındaki korelasyonun 0,58 olduğu görülmektedir. Stres ile duygusal tükenme arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının 0,55, stres ile duyarsızlaşma arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının ise 0,56 olduğu görülmektedir. Yine duyarsızlaşma ile duygusal tükenme arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının 0,34, duyarsızlaşma ile kişisel başarı arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının ise 0,21 olduğu görülmektedir. Duygusal tükenme ile dışsal iş tatmini arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının -0,63, duygusal tükenme ile içsel iş tatmini arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının ise -0,54 olduğu görülmektedir. Kişisel başarı eksikliği ile duygusal tükenme arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının 0,11, kişisel başarı eksikliği ile içsel tükenme arasındaki standardize edilmiş regresyon katsayısının ise -0,30 olduğu görülmektedir.

Duygusal tükenme değişkenindeki toplam değişimin %67'si stres, duyarsızlaşma ve kişisel başarı eksikliği ile açıklanmaktadır. Duyarsızlaşma değişkeninin toplam değişiminin sadece %31'i stres tarafından açıklanmaktadır. İçsel iş tatmini değişkenindeki toplam değişimin %46'sı, dışsal iş tatmini değişkenindeki toplam değişimin ise %40'ı uygulanan model ile açıklanabilmektedir.

Stresin duygusal tükenme ve duyarsızlaşma ile aynı yönde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Kişisel başarı eksikliğinin duygusal tükenme ile aynı yönde istatistiksel olarak anlamlı olduğu ancak içsel iş tatmini ile ters yönde istatistiksel

olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, dışsal iş tatmini ve içsel iş tatmininin aynı yönde istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir.

Bunlara ek olarak, stres ile dışsal ve içsel tatmin arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlenmemiştir. Ayrıca, duyarsızlaşma ile diğer ölçekler ve alt ölçekler arasında da doğrudan bir ilişki olmadığı görülmektedir.

Tablo 5. Standartlaştırılmış Dolaylı Regresyon Etkileri

	Stres	Duyarsızlaşma	Kişisel Başarı	Duygusal Tükenmişlik
Duyarsızlaşma	.000	.000	.000	.000
Kişisel Başarı	.118	.000	.000	.000
Duygusal Tükenmişlik	.201	.024	.000	.000
İçsel Doyum	-.439	-.257	-.060	.000
Dışsal Doyum	-.476	-.228	-.071	.000

Tablo 5'e göre standardize edilmiş dolaylı etkiler incelendiğinde; duygusal tükenmenin kişisel başarı, duygusal tükenme, içsel ve dışsal tatmin ile; stresin sadece duyarsızlaşma ile, kişisel başarının duyarsızlaşma ve duygusal tükenme ile; son olarak duyarsızlaşmanın kişisel başarı ile istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki içinde olduğu görülmektedir. Buna ek olarak, stres, duyarsızlaşma ve kişisel başarının içsel ve dışsal tatmin ile negatif yönde bir ilişkisi vardır.

3.3. Yapısal Eşitlik Modellemesi

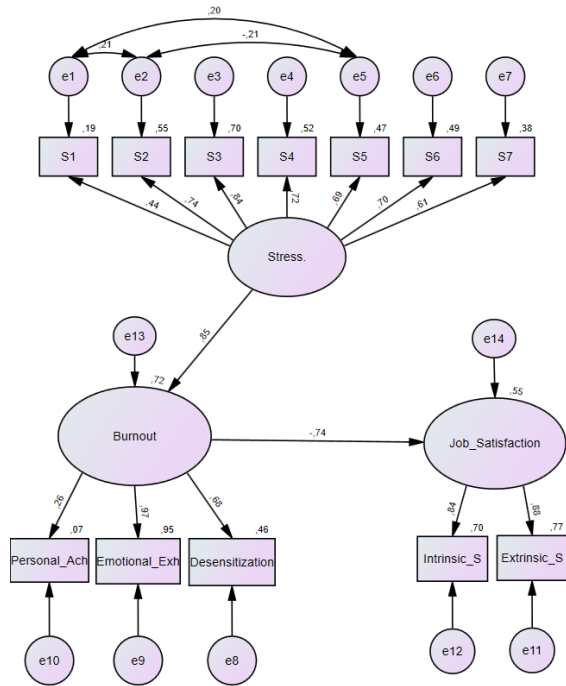
Tablo 6. Yapısal Eşitlik Modellemesi Kriter ve Endeksleri Tablosu

Model	P	CMI	CMIN	SR	G	BIC	C
		N	/DF	MR	FI		FI
Temel model	**	119.	2.44	.06	.90	270.	.94
	*	418				81	
Doyum model						407.	
						19	
Bağımsız model						1228	
						.01	

*** *p* değerinin 0,01'den küçük ve istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ve CMIN= ki-kare

Tablo 6'daki uyum indeksleri incelendiğinde, sadece CFI uyum indeksinin istatistiksel olarak (0,95≤CFI) anlamlı olmadığı, diğerlerinin ise anlamlı olduğu görülmektedir. Yapısal eşitlik modellemesinde birkaç uyum indeksi incelenir ve bunların çoğunluğu istatistiksel olarak anlamlı olduğu sürece model kabul

edilir [48]. İstatistiksel olarak anlamlı görülen diğer uyum indeksleri kontrol edildiğinde de modelin iyi uyum gösterdiği görülmektedir.



Şekil 2. Stres, Tükenmişlik ve İş Tatmini Arasındaki İlişkinin Yapısal Eşitlik ile Gösterimi

(Not: *Extrinsic_S*: Dışsal Doyum, *Intrinsic_S*: İçsel Doyum, *Emotional_Ext*: Duygusal Tükenmişlik, *Personal_Ach*: kişisel başarı eksikliği; *Burnout*: Tükenmişlik; *Desensitization*: Duyarsızlaşma; *Job Satisfaction*: İş Doyumu; *Stress*: Stres)

Yol analizi sadece gözlenen değişkenlere dayanan bir yöntemdir. Yapısal eşitlik modellemesi, gizil değişkenler arasındaki nedensel ilişkileri ve etkileri tanımlar ve açıklanan ve açıklanmayan varyansı gösterir. Başka bir deyişle, gizil değişkenler arasındaki bağlantılar yapısal denklem modeli olarak tanımlanır (Bayram, 2010). Şekil 2'deki modelin tahmin sonuçları incelendiğinde, tüm parametrelerin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. İş tatmini gizil değişkeninin faktör yükleri 0.84 ile 0.88 arasında değişirken, tükenmişlik gizil değişkeninin faktör yükleri 0.26, 0.97 ve 0.68, stres gizil değişkeninin faktör yükleri ise 0.44 ile 0.84 arasında değişim göstermektedir. Tükenmişlik gizil değişkeni için belirtilen varyansın %85'i stres gizil değişkeninin doğrudan etkisi ile ifade edilmektedir.

İş tatmini gizil değişkeni için belirtilen varyansın negatif%74'ü, tükenmişlik gizil değişkeninin doğrudan etkisi ile eş zamanlı olarak hesaplanmış, aynı zamanda stres gizil değişkeninin dolaylı etkisi tükenmişlik gizil değişkeninin aracılığı ile elde edilmiştir.

Standardize edilmiş regresyon katsayısına bakıldığında stresin tükenmişlik düzeyi üzerinde pozitif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ($\beta=0,84$). Bunun yanı sıra, tükenmişlik düzeyinin iş tatmini üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir ($\beta=-0,74$).

Tablo 7. Yapısal Eşitlik Modellemesinin Standartlaştırılmış Dolaylı Regresyon Etkileri

	Stres	Tükenmişlik
Tükenmişlik	.000	.000
İş Doyumu	-.625	.000
İçsel Doyum	-.523	-.619
Dışsal Doyum	-.548	-.649
Kişisel Başarı	.218	.000
Duygusal Tükenmişlik	.822	.000
Duyarsızlaşma	.576	.000

Tablo 7'de standardize edilmiş dolaylı etkiler verilmiştir. Tabloya göre, stresin iş tatmini üzerinde tükenmişlik açısından -0,62 ile negatif yönde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Aynı şekilde, stresin tükenmişlik üzerinde -0,52 ile -0,54 arasında negatif yönde anlamlı bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.

3.4. Uyum İndeksleri

Tablo 8. Çalışmada kullanılan uyum indeksleri ve yorumları. [49, 50, 51]

Değerlendirme Göstergesi	Fit indeks	Tanım	Değer aralığı
Çıkarımsal uyum indeksi	χ^2 test	Varsayılan model ile veriler arasındaki uyumsuzluğu gösterir	$P > 0.05$
	χ^2 / sd	Değeri serbestlik derecesine bölünür. χ^2 testi, örneklem büyüklüğün e duyarlıdır.	$0 \leq \chi^2 / sd \leq 2$: İyi Uyum $2 < \chi^2 / sd \leq 3$: Kabul Edilebilir Uyum

Tablo 8. Çalışmada kullanılan uyum indeksleri ve yorumları. [49, 50, 51] (devamı)

Kalıntıl ara dayalı uyum endeksleri	GFI	Aynı şekilde, regresyon analizindeki R 2'ye benzer şekilde, tahminden elde edilen artıkların karesinin gerçek verilerle karşılaştırılması.	$0.95 \leq GFI \leq 1.0$ 0 : İyi Uyum $0.90 \leq GFI < 0.95$: Kabul Edilebilir Uyum
	SRMR	Gözlenen kovaryans ile tahmin edilen kovaryans arasındaki standartlaştırılmış fark.	$0 < SRMR \leq 0.05$: Good fit $0.05 < SRMR \leq 0.10$: Acceptable fit
Bağımsız modele dayalı uyum endeksleri	CFI	Ölçümler arasında hiçbir ilişki olmadığını varsayarak önerilen bir modelin boş modelle karşılaştırma mantığı.	$0.97 \leq CFI \leq 1.00$: Good fit $0.95 \leq CFI < 0.97$: Acceptable fit
Bilgi kriterine dayalı uyum endeksleri	BIC	Hipotezin BIC değeri, doymuş modelden ve bağımsız modelden küçük olmalıdır.	-

Not: χ^2 / sd : Ki-kare serbestlik derecesinin oranı, GFI: Uyum iyiliği indeksi, CFI: Karşılaştırmalı uyum indeksi, BIC: Bayes bilgi kriteri, SRMR: Standartlaştırılmış kök ortalama kare kalıntısı, RMSEA: Yaklaşık hataların ortalama karekökü

Tablo 8'de uyum indeksleri verilmiştir. Ki-kare (χ^2) istatistiği modelin uyumunu ölçen en temel ölçektir.

3.5. Moderatör Regresyon Analizi

Tüm moderatörler test edilmiştir. Ancak bu çalışmada sadece moderatör analizinden elde edilen istatistiksel olarak anlamlı sonuçlara yer verilmiştir.

Tablo 9. Parametreler Arasındaki Parametreler Arasındaki Farklar için Kritik Oranlar

	a	b	c	d
a	.000			
b	1.548	.000		
c	.542	-1.237	.000	
d	-.840	-2.659	-1.534	.000

(Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisinin aylık gelirler üzerinden değerlendirilmesi. a-moderatör 3 bin ve altı, b-moderatör 3 ile 4 bin, c-moderatör 4 ile 5 bin, d-moderatör 5 ile 6 bin ve e-moderatör 6 bin ve üzerini temsil etmektedir).

Tablo 9'a göre yapılan kategorik değişken ve moderatör regresyon analizinde istatistiksel anlamlılık düzeyinin $p < 0.005$ olduğu gözlemlenerek P-değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Aylık gelirin a-moderatörü 3 bin ve altı, b-moderatörü 3 ile 4 bin, c-moderatörü 4 ile 5 bin, d-moderatörü 5 ile 6 bin ve e-moderatörü 6 bin ve üzerini temsil etmektedir. Parametreler için kritik oranlar incelendiğinde b'den c'ye ve b'den c'ye mutlak değer bazında etki 1.96'dan büyük olduğu için hipotezin istatistiksel olarak anlamlı olduğu ortaya çıkmıştır [52]. Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi aylık gelire bağlı olarak değişmektedir. Tabloya göre:

- Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi, yaklaşık 4-5 bin aylık gelir elde eden iş güvenliği uzmanlarında, yaklaşık 5-6 bin aylık gelir elde eden iş güvenliği uzmanlarına kıyasla daha fazladır.

- Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi, yaklaşık 4-5 bin aylık gelir elde eden iş güvenliği uzmanlarında, yaklaşık 6 bin ve üzeri aylık gelir elde eden iş güvenliği uzmanlarına göre daha fazladır.

- Tablodan 4 binden az kazancın anlamlı olmadığı görülmektedir.

Tablo 10. Parametreler Arasındaki Farklar için Kritik Oranlar

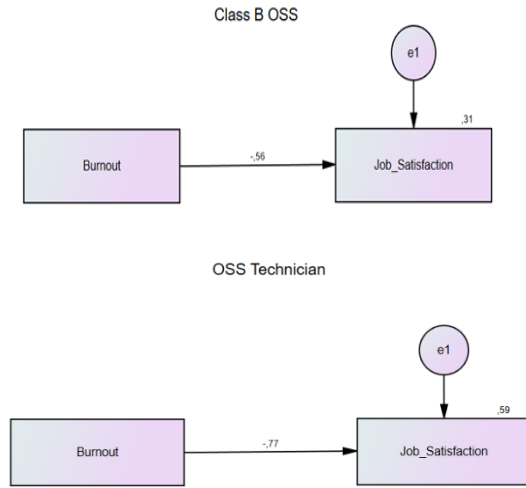
	a	b	c	d	e
a	.000				
b	-1.308	.000			
c	.335	1.994	.000		
d	.391	1.300	.196	.000	
e	.686	2.301	.439	.059	.000

(Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisinin uzmanlık sınıfı üzerinden değerlendirilmesi (a-moderatör A sınıfı İGU, b-moderatör B sınıfı İGU, c-moderatör C sınıfı İGU, d-moderatör iş güvenliği teknikeri)

Kategorik değişken ve yapılan moderatör regresyon analizinde istatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0,005$ olarak gözlemlenerek P-değerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Tablo 10'da a-moderatör A sınıfı İGU'yu, b-moderatör B sınıfı İGU'yu, c-moderatör C sınıfı İGU'yu, d-moderatör İş Güvenliği Teknikeri temsil etmektedir. Parametreler için kritik oranlar incelendiğinde b'den d'ye mutlak değer baz alındığında etki 1,96'dan büyük olduğu için hipotez istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi uzmanlık sınıfına bağlı olarak değişmektedir. Tabloya göre:

- Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi, B sınıfı İGU'ya iş güvenliği teknikerlerinde göre teknik üzerinde negatif yönde daha fazladır.

- Tablodan C sınıfı İGU verilerinin anlamlı olmadığı görülmektedir.



Şekil 3. Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi ve B sınıfı İGU ve İş Güvenliği Teknikerinin yol diyagramında gösterimi (Not: Burnout: Tükenmişlik; Job Satisfaction: İş Tatmini)

Şekil 3'te görüldüğü üzere, B sınıfı İGU'nun iş tatmini tükenmişliği üzerindeki standardize edilmiş regresyon katsayısı etkisi -0,56 iken, uygulayıcının iş tatmini tükenmişliği üzerindeki etkisinin -0,77 olduğu tespit edilmiştir.

İstanbul'da yapılan bu çalışmada, tablo 2'deki medyan puana göre İGU'ların stres düzeyinin ortalamadan daha iyi olduğu görülmüştür. Benzer bir çalışmada da İGU'ların orta düzeyde strese sahip olduğu ve katılımcıların %26'sının yüksek strese sahip olduğu görülmüştür [9]. Kamu kurumlarında çalışan İGU'ların, sağlık ocakları ve özel polikliniklerde çalışan İGU'lara kıyasla en yüksek stres düzeyine sahip olduğu tespit edilmiştir [9]. Literatürde İGU'larla ilgili çalışmalar nispeten yetersiz olduğundan, karşılaştırma diğer meslekler temel alınarak yapılmıştır.

Gerçekleştirilen modelleme çalışmasında, işle ilgili stresin tükenmişliği olumlu yönde, tükenmişliğin ise iş tatminini olumsuz yönde anlamlı bir şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Bu bulguların birbiriyle doğrudan bağlantılı olduğu gösterilmiştir. Stres, yol analizinde duygusal tükenme ve duyarsızlaşmayı etkilemektedir. Buna ek olarak, duygusal tükenmenin içsel ve dışsal iş tatminini etkilediği, kişisel başarının ise sadece içsel tatmini etkilediği ortaya çıkmıştır. İlk ve ortaokul öğretmenleri üzerinde yapılan bir araştırma, öğretmenlerin içsel ve dışsal iş tatmini düzeyleri ile tükenmişlik algıları arasında negatif ve düşük düzeyde bir ilişki olduğunu göstermektedir [53]. Hemşireler üzerinde yapılan bir çalışmada işe bağlı stresin duygusal tükenme, duyarsızlaşma ve toplam tükenme ile pozitif yönde yüksek korelasyona sahip olduğu, kişisel başarı alt boyutu ile negatif yönde orta düzeyde korelasyona sahip olduğu görülmektedir [37]. Suudi Arabistan'da hemşireler üzerine yapılan bir çalışmada ise stresin hem doğrudan hem de dolaylı olarak tükenmişliği etkilediği ve ikincil travmatik stres ile iş tatmini arasında negatif yönde doğrudan bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır [54]. Hemşireler ve psikiyatristler üzerinde yapılan bir çalışmada tükenmişliğin iş tatmini üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu belirtilmektedir [55]. Çalışanların iş tatmini ile güvenlik algısı arasında pozitif bir ilişki olduğunu göstermektedir [56]. Daha önceki çalışmalar, işle ilgili stres ve iş tatmini arasındaki ilişkiyi doğrulamaktadır [57]. Muhasebiciler arasında yapılan bir çalışmada sağlık alanında yapılan çalışmalarda iş tükenmişliği ile iş tatmini arasında anlamlı bir ilişki olduğunu vurgulamış olsa da, muhasebeciler için geçerli olmadığı sonucuna varılmıştır [58]. Aydın ili sınırları içerisinde Dinibütün [59] tarafından hekimler üzerine yapılan çalışmada çalışmamıza benzer sonuçlar olarak tükenmişlik ve iş doyumu arasında negatif bir ilişki bulunduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bir başka çalışmada iş güvenliği uzmanlarının yaşadığı rol belirsizlikleri ve rol çatışmalarının mesleki tükenmişliği etkilediği ortaya konulmuştur [6].

Moderatör regresyon analizinde aylık gelirler moderatör değişken olarak düzenlendiğinde, tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi ile aylık gelir arasında ters yönlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aylık gelir azaldıkça tükenmişliğin stres üzerindeki etkisinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Dünya Bankası'na göre, Türkiye'nin kişi başına düşen GSYH'si (Gayri Safi Yurtiçi Hasıla) 7 yıldır azalıyor [60]. Bu sonuçlar kişi başına düşen gelir ile ilişkilendirilebilir. Bizim çalışmamızın aksine, [55] tarafından yapılan bir çalışmada maaş memnuniyetinin tükenmişlikle istatistiksel olarak anlamlı bir ilişkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte Hasanzade ve Gholami [61] tarafından yapılan araştırmada yaptığımız çalışmadaki benzer bir sonuç olarak gelir düzeyi ve iş tatmini arasında çok güçlü bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. İş tatmininin ve mesleki tükenmişliğin hemşireler üzerine olan etkisi

incelendiği bir çalışmada [62] finansal tatminin hemşirelerin hastalara ve işe bağlılığıyla pozitif yönde bir ilişkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisinin belirtildiği Şekil 3 incelendiğinde, B sınıfı İGU çalışanlarına kıyasla iş güvenliği teknikeri olarak görev yapan çalışanlar üzerindeki etkisinin olumsuz yönde daha yüksek olduğu görülmektedir. İş Güvenliği Teknikerleri Türkiye'de yardımcı pozisyonundadır. İş ilanları incelendiğinde teknikerlerin sahada gözlem yapma, denetleme, belgelemeye yardımcı olma vb. işlerde kullanıldığı görülmektedir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda olumsuz etki, iş güvenliği uzmanı açısından incelendiğinde tükenmişliğin iş tatmini üzerindeki etkisi olarak açıklanabilir. Olumsuz etki, iş güvenliği uzmanı açısından incelendiğinde tükenmişliğin iş tatminine etkisi olarak açıklanabilir.

Yapılan analiz sonuçları incelendiğinde, tablo 2'deki medyan puana göre İGU ve İGT iş tatminlerinin ortalamasının üzerinde olduğu görülmektedir. Yaptığımız çalışmadaki sonuç gibi, literatürdeki bir başka çalışmayı incelediğimizde de iş güvenliği uzmanlarının çoğunlukla yüksek düzeyde iş tatmini yaşadıkları ifade edilmektedir [63].

Guennoc et al. [29] tarafından yapılan çalışma sonucunda, stres ve işe bağlılığın İSG'yi etkilediği ve İGU'ların bu tür uygulamaların yürütülmesinde ve performansta kilit bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Yaptığımız bu çalışmada, Türkiye'deki İGU ve İş Güvenliği Teknikerlerinin iş tatmini üzerinde tükenmişliğin olumsuz etkisi nedeniyle, İSG uygulamalarının yürütülmesinde ve performansında büyük etki gösteren İGU ve İş Güvenliği Teknikerleri üzerinde gerekli iyileştirmelerin yapılması ve stresin azaltılması gerekmektedir.

Yapılan testler sonucunda aylık gelir ve uzmanlık sınıfları haricinde diğer demografik bilgiler arasında (cinsiyet, yaşı mezuniyet durumu, medeni hal, çocuk sahibi olma, iş tecrübesi, çalışma çeşidi) anlamlı bir fark bulunmamıştır.

3.6. Hipotezler ve Sonuçları

Anket verileri üzerinden yapılan istatistiksel analizlerde, hipotez testleri kullanılarak değişkenler arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan hipotezler ve analiz süreçleri şu şekilde özetlenmektedir:

H1: İş stresi, tükenmişlik düzeyi üzerinde anlamlı bir etkiye sahiptir.

H2: İş stresi, iş tatmini üzerinde negatif bir etkiye sahiptir.

H3: Tükenmişlik, iş tatmini üzerinde negatif bir etkiye sahiptir.

Bu hipotezlerin test edilmesi için regresyon analizi ve yapısal eşitlik modellemesi (SEM) kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda H1 hipotezi doğrulanmış ve iş stresinin tükenmişliği artırdığı tespit edilmiştir ($p < 0.05$). H2 hipotezi de desteklenmiş ve iş stresinin iş tatminini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir ($p < 0.05$). H3 hipotezi ise istatistiksel olarak anlamlı bulunmuş ve tükenmişliğin iş tatmini üzerinde negatif bir etkisi olduğu belirlenmiştir ($p < 0.01$).

Elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında büyük ölçüde tutarlıdır. Özellikle X ve Y (Yıl) tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiş ve iş güvenliği uzmanlarının yüksek iş stresine bağlı olarak tükenmişlik yaşadığı, bu durumun iş tatminini düşürdüğü gösterilmiştir.

Bu sonuçlar, iş güvenliği uzmanlarının psikososyal risk faktörlerini azaltmaya yönelik kurumsal önlemler alınmasının önemini vurgulamaktadır. İş yükünün dengeli dağıtılması, stres yönetimi eğitimleri ve psikolojik destek programları gibi uygulamaların, iş güvenliği uzmanlarının tükenmişlik seviyelerini azaltarak iş tatminlerini artırabileceği düşünülmektedir.

IV. SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye'deki iş güvenliği uzmanlarının işe bağlı stres, tükenmişlik ve iş tatmini arasındaki ilişkilerini inceleyerek, bu uzmanların karşılaştığı psikososyal risk faktörlerinin mesleki yaşamları üzerindeki etkilerine ışık tutmuştur. Araştırma bulguları, stresin duygusal tükenme ve duyarsızlaşma yoluyla iş tatminini önemli ölçüde azalttığını ve özellikle iş güvenliği teknikerlerinin, iş güvenliği uzmanlarına kıyasla daha yüksek düzeyde stres yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu durum hem bireysel hem de organizasyonel düzeyde ele alınması gereken önemli bir soruna işaret etmektedir.

Yapısal eşitlik modellemesi ve yol analizi yöntemlerinin kullanıldığı bu araştırma, Türkiye'de bu alanda yapılan ilk kapsamlı çalışmalardan biri olarak dikkat çekmektedir. Bulgular, iş güvenliği uzmanlarının mesleki koşullarının iyileştirilmesinin, işe bağlı stresin azaltılmasında ve tükenmişliğin önlenmesinde kritik bir rol oynayacağını göstermektedir. Özellikle, iş güvenliği teknikerlerinin çalışma ortamlarının yeniden değerlendirilmesi ve psikososyal destek mekanizmalarının güçlendirilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır.

Sonuç olarak, iş güvenliği uzmanlarının iş tatmini düzeylerini artırmak, stres ve tükenmişliği azaltarak mesleki başarıyı ve genel refahı desteklemek amacıyla daha fazla araştırma ve politika geliştirilmesi önerilmektedir. Bu çalışma, iş sağlığı ve güvenliği alanında hem akademik hem de uygulamalı yaklaşımlar için önemli bir başlangıç noktası sunmakta ve bu alandaki gelecekteki çalışmalara zemin hazırlamaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Öçal M, & Çiçek Ö. (2017). Türkiye ve Avrupa Birliği'nde İş Kazası Verilerinin Karşılaştırmalı Analizi . Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi, 6(16), 616-637.
- [2] Temur, S., & Mertoğlu, B. (2019). TÜRKİYE VE ÇEKYA ARASINDAKİ GÜVENLİK KÜLTÜRÜNE BAKIŞ AÇISI ÜZERİNE İRDELEME. İçinde OHS ACADEMY (C. 2, Sayı 2, ss. 67-76). OHS Academy. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ohsacademy/issue/45189/560961>
- [3] İş Sağlığı ve Güvenliği Katip. (2021). İş Sağlığı ve Güvenliği Katip . <https://isgkatip.ailevecalisma.gov.tr/Logout.aspx>
- [4] U.S. Bureau of Labor Statistics. (2024, Ağustos 24). *Occupational Health and Safety Specialists and Technicians*. <https://www.bls.gov/ooh/healthcare/occupational-health-and-safety-specialists-and-technicians.htm>.
- [5] Nikolić, V., Taradi, J., & Petković, A. I. (2021). Workplace stress of occupational safety specialists in Croatia and Serbia. <https://doi.org/10.3233/WOR-213581>, 70(2), 419-431. <https://doi.org/10.3233/WOR-213581>
- [6] Öztürk, T. (2023). İş Güvenliği Uzmanlarında Rol Belirsizliği ve Rol Çatışmasının Mesleki Tükenmişlikle İlişkisi. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 35(3), 389-405. <https://doi.org/10.7240/JEPS.1316447>
- [7] Cüceloğlu, D. (1993). İnsan ve Davranışı. Remzi Kitabevi.
- [8] Lazarus RS. (1991). Psychological Stress in the Workplace. *Journal of Social Behaviour and Personality*, 6, 1-13.
- [9] Radulović, A. H., & Varošanec, A. M. (2020). Work-related stress in specialists in occupational health in Croatia: a pilot study. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 71(4), 375-380. <https://doi.org/10.2478/aiht-2020-71-3421>
- [10] Hassard, J., Teoh, K., Cox, T., Cosmar, M., Gründler, R., Flemming, D., Cosemans, B., & van den Broek, K. (2014). Calculating the cost of work-related stress and psychosocial risks. Publications Office of the European Union.
- [11] Maslach, C., & Leiter, M. P. (2008). Early predictors of job burnout and engagement. *Journal of Applied Psychology*, 93(3), 498-512. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.93.3.498>
- [12] Maslach, C., & Jackson, S. E. (1981). The measurement of experienced burnout. *Journal of Organizational Behavior*, 2(2), 99-113. <https://doi.org/10.1002/job.4030020205>
- [13] Halbesleben, J. R. B., & Buckley, M. R. (2004). Burnout in Organizational Life. *Journal of Management*, 30(6), 859-879. <https://doi.org/10.1016/j.jm.2004.06.004>
- [14] Maslach, C., Schaufeli, W. B., & Leiter, M. P. (2003). Job Burnout. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.397>, 52, 397-422. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PSYCH.52.1.397>
- [15] Julià, M., Catalina-Romero, C., Calvo-Bonacho, E., & Benavides, F. G. (2013). The impact of job stress due to the lack of organisational support on occupational injury. *Occupational and Environmental Medicine*, 70(9), 623-629. <https://doi.org/10.1136/oemed-2012-101184>
- [16] Nahrgang, J. D., Morgeson, F. P., & Hofmann, D. A. (2011). Safety at work: A meta-analytic investigation of the link between job demands, job resources, burnout, engagement, and safety outcomes. *Journal of Applied Psychology*, 96(1), 71-94. <https://doi.org/10.1037/a0021484>
- [17] Tong, R., Yang, X., Li, H., & Li, J. (2019). Dual process management of coal miners' unsafe behaviour in the Chinese context: Evidence from a meta-analysis and inspired by the JD-R model. *Resources Policy*, 62, 205-217. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.03.019>
- [18] Poon, S. W., Rowlinson, S. M., Koh, T., & Deng, Y. (2013). Job Burnout and Safety Performance in the Hong Kong Construction Industry. *International Journal of Construction Management*, 13(1), 69-78. <https://doi.org/10.1080/15623599.2013.10773206>
- [19] Li, X., Fei, Y., Rizzuto, T. E., & Yang, F. (2021). What are the occupational hazards of construction project managers: A data mining analysis in China. *Safety Science*, 134, 105088. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2020.105088>
- [20] Reason, J. (1995). A systems approach to organizational error. *Ergonomics*, 38(8), 1708-1721. <https://doi.org/10.1080/00140139508925221>
- [21] SAKALLI, A. E. (2019). A TİPİ VE B TİPİ KİŞİLİK ÖZELLİĞİNE SAHİP BİREYLERDE İŞ DOYUMU VE KAZALANMA ARASINDAKİ İLİŞKİNİN İNCELENMESİ. OHS ACADEMY (C. 2, Sayı 1, ss. 11-31). <https://dergipark.org.tr/en/pub/ohsacademy/issue/44841/503695>
- [22] Maslach, C., Jackson, S. E., & Leiter, M. P. (1997). Maslach Burnout Inventory: Third edition. İçinde *Evaluating stress: A book of resources*. (ss. 191-218). Scarecrow Education.
- [23] Akçamete, A. G., Kaner, S., & Sucuoğlu, N. B. (2001). Tükenmişlik iş doyum ve kişilik . Nobel Kitabevi.
- [24] Başören, M. (2005). Çeşitli Değişkenlere Göre Rehber Öğretmenlerin Tükenmişlik Düzeylerinin İncelenmesi [Unpublished Master Thesis]. Zonguldak Karaelmas University.

- [25] Seçer, İ. (2011). Psikolojik Danışmanların Tükenmişlik Düzeylerinin Çeşitli Değişkenler Açısından İncelenmesi [Master Thesis]. Atatürk University.
- [26] Koroğlu, Ö. (2012). DETERMINATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE LEVELS OF INTRINSIC AND EXTRINSIC JOB SATISFACTION WITH LEVEL OF GENERAL JOB SATISFACTION: AN INVESTIGATION ON TOUR GUIDES. *Journal*, 13(2), 275-289.
- [27] Korsakienė, R., Stankevičienė, A., Šimelytė, A., & Talačkienė, M. (2014). FACTORS DRIVING TURNOVER AND RETENTION OF INFORMATION TECHNOLOGY PROFESSIONALS. *Journal of Business Economics and Management*, 16(1), 1-17. <https://doi.org/10.3846/16111699.2015.984492>
- [28] Bezdrob, M., & Šunje, A. (2021). Transient nature of the employees' job satisfaction: The case of the IT industry in Bosnia and Herzegovina. *European Research on Management and Business Economics*, 27(2), 100141. <https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2020.100141>
- [29] Guennoc, F., Chauvin, C., & Le Coze, J.-C. (2019). The activities of occupational health and safety specialists in a high-risk industry. *Safety Science*, 112, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.10.004>
- [30] Ministry of Labour and Socail Security. (2012). Regulation on Duties, Authorities, Responsibilities and Training of Occupational Safety Experts. [<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuat?MevzuatNo=16923&MevzuatTur=7&MevzuatTertip=5>]
- [31] ÇSGB. (2012). 6331 Occupational Health and Safety Law. [<https://www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/1.5.6331.pdf>]
- [32] Anderson, J. C., & Gerbing, D. W. (1988). Structural equation modeling in practice: A review and recommended two-step approach. *Psychological Bulletin*, 103(3), 411-423. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.103.3.411>
- [33] House, R. J., & Rizzo, J. R. (1972). Toward the measurement of organizational practices: Scale development and validation. *Journal of Applied Psychology*, 56(5), 388-396. <https://doi.org/10.1037/h0033444>
- [34] Efeoğlu, G. (2006). İş-Aile yaşam çatışmasının iş stresi, iş doyumu ve örgütsel bağlılık üzerindeki etkileri: ilaç sektöründe bir araştırma [Unpublished Doctoral Thesis]. Çukurova University.
- [35] Ergin, C. (1992). Doktor ve hemşirelerde tükenmişlik ve Maslach tükenmişlik ölçeğinin uyarlanması. VII. Ulusal Psikoloji Kongresi. Ankara.
- [36] Garrosa, E., Rainho, C., Moreno-Jiménez, B., & Monteiro, M. J. (2010). The relationship between job stressors, hardy personality, coping resources and burnout in a sample of nurses: A correlational study at two time points. *International Journal of Nursing Studies*, 47(2), 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2009.05.014>
- [37] Çolakoğlu, Ö. (2017). Pediatrik onkoloji hemşirelerinin deneyimleri, stres düzeyleri ve tükenmişlikleri üzerine bir çalışma [Doctoral Thesis]. Okan University.
- [38] Weiss, D. J., Dawis, R. V., & England, G. W. (1967). Manual for the Minnesota Satisfaction Questionnaire. Minnesota Studies in Vocational Rehabilitation, 22, 120.
- [39] Spector, P. E. (1997). Job Satisfaction: Application, Assessment, Cause and Consequences. SAGE Publications.
- [40] Hoyle, R. H. (1995). Structural equation modelling: Concepts, issues, and applications. SAGE Publications.
- [41] Bahadır, E., Kalender, B., Yumuşak, F. N., Karaman, G., Ladikli, N., Türkkan, Z., & Turhal, S. M. (2018). A COMPARISON STUDY ON MODELING ANALYSIS: STRUCTURAL EQUATION AND REGRESSION. *Journal*, 16, 410-420.
- [42] Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2001). SAS for windows workbook for Tabachnick and Fidell using multivariate statistics. Allyn and Bacon.
- [43] Bagozzi, R. P., & Fornell, C. (1982). Theoretical concepts, measurements, and meaning. İçinde A second generation of multivariate analysis (2. bs, C. 2, ss. 5-23).
- [44] Kline, R. B. (2015). Principles and practice of structural equation modeling. Guilford publications.
- [45] Kim, E., Sok, S. R., & Won, C. W. (2021). Factors affecting frailty among community-dwelling older adults: A multi-group path analysis according to nutritional status. *International Journal of Nursing Studies*, 115, 103850. <https://doi.org/10.1016/J.IJNURSTU.2020.103850>
- [46] Korkmaz, H., Koyuncu, M., & Sünnetçioğlu, S. (2015). Duygusal Emek Davranışlarının Tükenmişlik Ve İşten Ayrılma Niyeti İle İlişkisi: Yiyecek İçecek Çalışanları Üzerinde Bir Araştırma. *Journal*, 7(12), 14-33.
- [47] Baron, R., & Kenny, D. (1986). Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator-mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, 51(6), 1173. *Journal of personality and social psychology*. <https://psycnet.apa.org/buy/1987-13085-001>

- [48] Bayram, N. (2010). Yapısal eşitlik modellemesine giriş AMOS uygulamaları. Ezgi Kitabevi.
- [49] Hsu, I.-Y., Su, T.-S., Kao, C.-S., Shu, Y.-L., Lin, P.-R., & Tseng, J.-M. (2012). Analysis of business safety performance by structural equation models. *Safety Science*, 50(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.012>
- [50] Mokarami, H., Alizadeh, S. S., Rahimi Pordanjani, T., & Varmazyar, S. (2019). The relationship between organizational safety culture and unsafe behaviors, and accidents among public transport bus drivers using structural equation modeling. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 46-55. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.07.008>
- [51] Weston, R., & Gore, P. A. (2006). A Brief Guide to Structural Equation Modeling. *The Counseling Psychologist*, 34(5), 719-751. <https://doi.org/10.1177/0011000006286345>
- [52] Okçu, V., & Çetin, H. (2017). Investigating the Relationship among the Level of Mobbing Experience, Job Satisfaction and Burnout Levels of Primary and Secondary School Teachers. *Universal Journal of Educational Research*, 5(1), 148-161.
- [53] Melchior, M. E. W., Bours, G. J. J. W., Schmitz, P., & Wittich, Y. (1997). Burnout in psychiatric nursing: a meta-analysis of related variables. *Journal of Psychiatric and Mental Health Nursing*, 4(3), 193-201. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2850.1997.00057.x>
- [54] Shdaifat, E., Al-Shdayfat, N., & Al-Ansari, N. (2023). Professional Quality of Life, Work-Related Stress, and Job Satisfaction among Nurses in Saudi Arabia: A Structural Equation Modelling Approach. *Journal of Environmental and Public Health*, 2023(1), 2063212. <https://doi.org/10.1155/2023/2063212>
- [55] Kader, N., Elhusein, B., Elhassan, N. M., Alabdulla, M., Hammoudeh, S., & Hussein, N.-R. (2021). Burnout and job satisfaction among psychiatrists in the Mental Health Service, Hamad Medical Corporation, Qatar. *Asian Journal of Psychiatry*, 58, 102619. <https://doi.org/10.1016/j.ajp.2021.102619>
- [56] Bergheim, K., Nielsen, M. B., Mearns, K., & Eid, J. (2015). The relationship between psychological capital, job satisfaction, and safety perceptions in the maritime industry. *Safety Science*, 74, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.11.024>
- [57] Graham, K. R., Davies, B. L., Woodend, A. K., Simpson, J., & Mantha, S. L. (2011). Impacting Canadian Public Health Nurses' Job Satisfaction. *Canadian Journal of Public Health*, 102(6), 427-431. <https://doi.org/10.1007/BF03404193>
- [58] Hameli, K., Çollaku, L., & Ukaj, L. (2024). The impact of job burnout on job satisfaction and intention to change occupation among accountants: the mediating role of psychological well-being. *Industrial and Commercial Training*, 56(1), 24-40. <https://doi.org/10.1108/ICT-06-2023-0040/FULL/PDF>
- [59] Dinibutun, S. R. (2023). Factors Affecting Burnout and Job Satisfaction of Physicians at Public and Private Hospitals: A Comparative Analysis. *Journal of Healthcare Leadership*, 15, 387-401. <https://doi.org/10.2147/JHL.S440021>
- [60] World Bank. (2020). World Bank Reports . [\[https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PC.AP.CD?locations=TR\]](https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PC.AP.CD?locations=TR).
- [61] Hasanzadeh, elham, & Gholami, J. (2022). Possible relationship among experience, age, income level, gender, and job satisfaction. *Acuity: Journal of English Language Pedagogy, Literature and Culture*, 8(1), 35-46. <https://doi.org/10.35974/acuity.v8i1.2848>
- [62] Jarosz, K., & Mlynarska, A. (2024). The Impact of Sociodemographic Factors on Job Satisfaction and Professional Burnout among Nurses in Urology Departments. *Nursing Reports* 2024, Vol. 14, Pages 883-900, 14(2), 883-900. <https://doi.org/10.3390/NURSREP14020068>
- [63] CEREV, G. (2018). İŞ GÜVENLİĞİ UZMANLARININ GENEL, İÇSEL VE DIŞAL İŞ TATMİN DÜZEYLERİNİN İNCELENMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA. *Yönetim Bilimleri Dergisi*, 16(32), 91-112. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/comuybd/issue/40668/414863>

Acil Durum Çağrı Merkezi Uygulamalarında Kullanıcı Memnuniyeti ve Performans Analizi: 112 Örneği

User Satisfaction and Performance Analysis in Emergency Call Center Applications: The Case of 112

Yusuf SELİMDAROĞLU¹ , Özgür TONKAL¹ 

¹Samsun Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

Öz

Bu çalışma, 112 Acil Çağrı Merkezi Uygulamasının işlevselliğini ve kullanıcı memnuniyetini değerlendirmek amacıyla beş test senaryosu tasarlayarak 3056 kişilik bir örneklem üzerinde uygulanmıştır. Test sonuçları ve memnuniyet anketleri istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek, uygulamanın performansına dair kapsamlı veriler elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca, test senaryolarının kısıtlılıkları ele alınmış ve bu senaryoların daha gerçekçi, kapsamlı ve güvenilir hale getirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Bulgular, çalışma yılı, cinsiyet ve yaş gibi demografik faktörlerin kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Elde edilen veriler, 112 Acil Çağrı uygulamasının iyileştirilmesine yönelik önemli çıktılar sunarak, acil durum müdahale sistemlerinin daha etkin ve verimli çalışmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Anahtar kelimeler: 112 Acil Çağrı Merkezi Uygulamaları, Test Senaryoları, Kullanıcı Memnuniyeti, Acil Durum Müdahale Sistemleri, Yazılım Test Süreçleri

Abstract

This study evaluates the functionality and user satisfaction of the 112 Emergency Call Center Application by designing five test scenarios and applying them to a sample of 3,056 participants. Test results and satisfaction surveys were analyzed using statistical methods, providing comprehensive data on the application's performance. Additionally, the study addresses the limitations of the test scenarios and offers recommendations for making them more realistic, comprehensive, and reliable. The findings reveal the impact of demographic factors such as study year, gender, and age on user satisfaction. The obtained data provide significant insights for improving the 112 Emergency Call Application, contributing to the more effective and efficient operation of emergency response systems.

Keywords: 112 Emergency Call Center Applications, Test Scenarios, User Satisfaction, Emergency Response Systems, Software Testing Processes

I. GİRİŞ

112 acil çağrı uygulamaları, acil durumlarda vatandaşların hızlı ve kolay bir şekilde yardım almasını sağlayan kritik öneme sahip araçlardır [1]. Bu uygulamaların etkin bir şekilde çalışması, insan hayatlarının kurtarılması ve kamu güvenliğinin sağlanması açısından oldukça önemlidir. Bu nedenle, 112 acil çağrı uygulamasının test süreçleri ve memnuniyet değerlendirilmesi, bu uygulamaların başarısının anahtarıdır.

Yazılım test süreçleri, FURPS+ modeli (Functionality - İşlevsellik, Usability - Kullanılabilirlik, Reliability - güvenilirlik, Performance - Performans, Supportability - Desteklenebilirlik) gibi temel kalite kriterlerine dayanarak tasarlanır ve uygulanır [2]. V-Model gibi test odaklı yazılım geliştirme modelleri, testlerin sistem tasarım aşamasından itibaren başlamasını ve geliştirme sürecinin her adımında doğrulama ve doğrulama süreçlerinin uygulanmasını önerir.

112 acil çağrı uygulamalarının test süreçleri, sistemin fonksiyonelliğini, güvenilirliğini ve performansını değerlendirmek amacıyla titizlikle tasarlanmış farklı test türlerinden oluşmaktadır. Birim testleri, sistemin her bir bileşenini ayrı ayrı değerlendirirken; entegrasyon testleri, farklı bileşenlerin birbirleriyle uyumlu çalışıp çalışmadığını analiz eder. Sistem testleri, yazılımın bir bütün olarak ele alınmasını ve performansının değerlendirilmesini sağlarken, kabul testleri, son kullanıcıların beklentilerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için gerçekleştirilir [3].

112 acil çağrı sistemleri için test süreçleri, yalnızca hata tespitine yönelik değil, aynı zamanda kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesi ve çağrı merkezlerindeki operasyonel verimliliğin artırılması açısından da önem taşımaktadır. Gerçek kullanıcı senaryolarına dayalı kapsamlı test planları, sistemin gerçek hayattaki acil durum senaryolarında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmek için gereklidir.

Performans testleri, yüksek çağrı yükü altında sistemin hızını ve yanıt verme süresini test ederken; güvenlik testleri, çağrı merkezi yazılımının siber tehditlere karşı dayanıklılığını ölçmeyi amaçlar [4].

Acil çağrı sistemleri, vatandaşların acil bir durumda en kısa sürede yardım almasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş kritik öneme sahip sistemlerdir. Bu sistemler, çağrıları yöneten operatörler aracılığıyla acil hizmet birimlerine yönlendirme yaparak sürecin hızlandırılmasını sağlamaktadır [6]. Acil çağrı merkezleri, coğrafi konum belirleme (GIS), ses analizi, otomatik çağrı yönlendirme ve yapay zeka destekli çağrı yönetim sistemleri gibi teknolojilerle donatılmıştır.

Avrupa'da eCall sistemleri, kaza yapan araçlardan otomatik olarak acil çağrı merkezlerine veri göndererek acil müdahale süreçlerini hızlandırmaktadır [7]. NG112 (Next Generation 112) projeleri, geleneksel sesli çağrıların ötesine geçerek video, SMS ve veri tabanlı çağrı sistemleri ile entegre çalışmayı hedeflemektedir [8]. ABD'de 911 çağrı sistemleri, gelişmiş konum belirleme ve büyük veri analitiği ile çağrıları daha etkin yönlendirebilmek için sürekli olarak geliştirilmektedir.

112 çağrı merkezlerinin işleyişi, çağrının alınması, doğru sınıflandırılması, ilgili birimlere yönlendirilmesi ve geri bildirim mekanizmaları ile sürecin takibini kapsamaktadır [9]. Günümüzde yapay zeka ve makine öğrenimi teknolojileri, önceliklendirilmiş çağrı yönlendirme ve otomatik dil algılama sistemleri ile acil çağrıların yönetilmesine yardımcı olmaktadır. Bu sistemlerin yazılım test süreçleri ile desteklenmesi, çağrı merkezlerinin operasyonel verimliliğini artırarak kritik müdahalelerin zamanında gerçekleştirilmesini sağlamaktadır.

Acil çağrı sistemlerinde kullanılan yazılım ve altyapının güvenilirliği, sistemin etkinliği açısından kritik öneme sahiptir. Yazılım test süreçleri, sistemlerin sorunsuz çalışmasını sağlamak için çeşitli test metodolojilerini içermektedir.

Test süreçlerinde kullanılan başlıca yöntemler şunlardır:

Fonksiyonel Testler – Sistemin belirlenen gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını doğrular. Performans Testleri – Çağrı merkezinin yoğun çağrı altında nasıl çalıştığını değerlendirir. Yük Testleri – Aşırı çağrı yükü, sonucu çökmesi ve bağlantı kesintisi gibi olağanüstü durumları analiz eder. Güvenlik Testleri – Veri gizliliği ve yetkisiz erişime karşı sistemin dayanıklılığını ölçer. Worst-Case Condition Testleri – Acil durum sistemlerinin en stresli koşullarda nasıl çalıştığını belirlemek için uygulanır [10].

NG112 projeleri, acil çağrı sistemlerinin güvenilirliğini artırmak için yeni test süreçleri ve uluslararası

standartlar geliştirmektedir [11]. FURPS+ modeli, acil durum yazılımlarında Fonksiyonellik (Functionality), Kullanılabilirlik (Usability), Güvenilirlik (Reliability), Performans (Performance) ve Desteklenebilirlik (Supportability) gibi temel kalite kriterlerini ölçmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Son yıllarda yazılım test otomasyonu, acil çağrı sistemlerinin daha güvenilir hale gelmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomatik test senaryoları, manuel testlere kıyasla daha hızlı ve kapsamlı sonuçlar sunarak, 112 çağrı merkezleri için daha az hata payı ve daha yüksek operasyonel verimlilik sağlamaktadır [13]. CI/CD (Continuous Integration / Continuous Deployment) süreçleri ile otomasyon testleri entegre edilerek sistemin her güncelleme sonrasında test edilmesi sağlanmaktadır.

Acil çağrı sistemlerinde kullanıcı memnuniyeti, sistemlerin başarısını ölçen en önemli faktörlerden biridir. Kullanıcı memnuniyeti, aşağıdaki temel kriterler üzerinden değerlendirilmektedir: Çağrı Yanıt Süresi – Acil durum çağrılarının ne kadar sürede yanıtlandığını ölçer. Yönlendirme Doğruluğu – Çağrının en uygun birime ne kadar doğru yönlendirildiğini analiz eder. Operatör Desteği – Çağrı merkezi personelinin kullanıcıya sağladığı destek hizmetlerini değerlendirir. Geri Bildirim Süreçleri – Kullanıcıların çağrı sonrası aldıkları hizmetten memnun olup olmadıklarını belirlemek için uygulanır [14].

Kullanıcı memnuniyeti ölçüm yöntemleri arasında anketler, veri analitiği ve performans değerlendirme testleri bulunmaktadır. Anket tabanlı değerlendirme sistemleri, acil çağrı merkezlerinde kullanıcı deneyimini ölçmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Veri analitiği, çağrı merkezi performansının zaman içindeki değişimini inceleyerek hizmet kalitesini artırmaya yönelik kararların alınmasını sağlamaktadır.

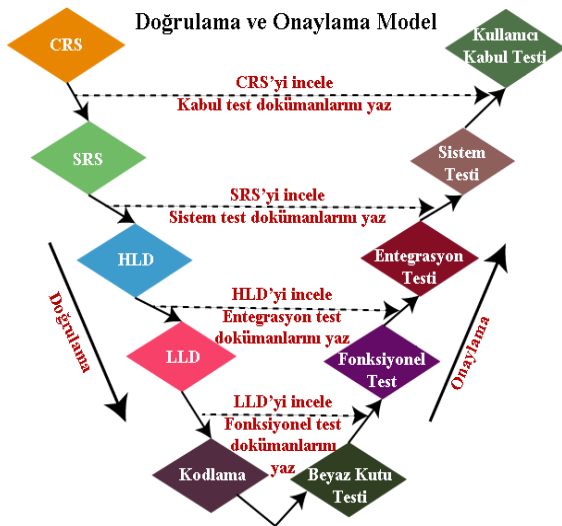
Simülasyon eğitimleri ve saha testleri, operatörlerin ve acil müdahale ekiplerinin gerçekçi senaryolarla eğitilmesini ve hata paylarının azaltılmasını sağlamaktadır. Özellikle yapay zeka destekli çağrı yönlendirme sistemleri, kullanıcıların taleplerine daha hızlı ve doğru şekilde yanıt verilmesini sağlayarak genel memnuniyeti artırmaktadır [15].

Literatürde yapılan çalışmalar, 112 acil çağrı uygulamalarının kullanıcı memnuniyetini artırmak için sürekli geri bildirim mekanizmalarına ve çağrı yönlendirme algoritmalarına yönelik optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç duyduğunu göstermektedir [16]. Yapay zeka, büyük veri analizi ve tahmine dayalı modelleme, acil çağrı sistemlerinde kullanıcı deneyimini iyileştirmek için kullanılan yeni teknolojiler arasında yer almaktadır.

Bu çalışma, 112 acil çağrı uygulamalarının test senaryolarını inceleyerek, yazılım geliştirme süreçlerinde hangi test stratejilerinin kullanıldığını değerlendirmekte ve kullanıcı memnuniyeti analizleri ile bu sistemlerin başarısını ölçmeyi amaçlamaktadır. Çalışmanın bulguları, yazılım test süreçlerinin acil durum müdahale sistemlerinin güvenilirliği üzerindeki etkisini anlamaya ve bu sistemlerin daha güvenli ve verimli hale getirilmesine yönelik öneriler geliştirmeye katkı sağlamaktadır.

II. YAZILIM TESTİ TEKNİKLERİ

Yazılım testi, bir yazılımın belirli gereksinimlere uygun olarak çalışıp çalışmadığını, doğru ve güvenilir sonuçlar üretmesiyle belirlenen özellikleri yerine getirip getirmediğini değerlendiren bir süreçtir. Yazılım testi süreci, yazılım geliştirme yaşam döngüsünün (SDLC) ayrılmaz bir parçasıdır ve yazılım kalitesini artırmayı, hataları erken tespit etmeyi ve yazılımın kullanıcı gereksinimlerini tam olarak karşılmasını sağlamayı hedefler [17].



Şekil 1. V modelin farklı aşamaları

Bu süreç, sistemin her aşamasında doğrulama ve geçirme faaliyetlerini içererek yazılımın güvenilirliğini artırır. Şekil 1'de verilen V-Model (V Chart), yazılım geliştirme ve test süreçlerinin birbirine paralel ilerlediğini göstermektedir. Modelin sol tarafı gereksinim analizi, sistem tasarımı ve modül tasarımı gibi geliştirme aşamalarını içerirken, sağ tarafı ise her geliştirme aşamasına karşılık gelen test süreçlerini göstermektedir. Bu yapı, her seviyede testlerin uygulanmasını sağlayarak hataların erken aşamada tespit edilmesine olanak tanır. Böylece, yazılımın daha sağlam ve güvenilir bir şekilde geliştirilmesi sağlanır. V-Model (V Chart) ile yapılandırılan yazılım testi süreci, yazılım kalitesini değerlendirmede kullanılan FURPS+ modelinin temel bileşenleriyle doğrudan ilişkilidir. FURPS+ modeli; İşlevsellik (Functionality), Kullanılabilirlik (Usability), Güvenilirlik (Reliability), Performans (Performance) ve Desteklenebilirlik

(Supportability) gibi yazılım kalite kriterlerini içermektedir [12]. V-Model'in sağ tarafında yer alan test süreçleri, FURPS+ kriterlerinin her birini sistematik olarak doğrulamak için uygulanmaktadır. Şekil 2' de bir yazılımın sahip olması gereken özellikler verilmiştir. 112 Acil Çağrı Merkezi Uygulaması- Yazılımı bu kapsamda geliştirilmiş olup FURPS+ kriterlerine göre değerlendirmelerde bulunulmuştur.



Şekil 2. Yazılımın özellikleri

Fonksiyonellik (Functionality), yazılımın istenilen gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını test eden bir kriterdir. Fonksiyonel testler, yazılımın kullanıcıya sunduğu işlevlerin doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını değerlendirir. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, fonksiyonellik testleri, yazılımın çağrı yönlendirme, veri işleme, hata yönetimi gibi temel işlevlerinin düzgün çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Bu tür testler, yazılımın beklenen özellikleri yerine getirip getirmediğini tespit eder [1].

Kullanılabilirlik (Usability), yazılımın ne kadar kullanıcı dostu olduğuna odaklanır. Kullanıcıların yazılımı öğrenme süresi, kullanım kolaylığı ve hatalı işlem yapma olasılıkları, kullanılabilirlik testlerinin hedeflediği alanlardır. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, kullanılabilirlik testleri, operatörlerin sistemle etkileşimini değerlendirmek için yapılır. Kullanıcı arayüzünün ne kadar sezgisel olduğu, operatörlerin çağrıları hızlı ve doğru bir şekilde yönetebilmesi için önemli bir faktördür. Kullanıcı memnuniyetini artırmak için sistemin kullanım kolaylığı test edilir [4].

Güvenilirlik (Reliability), yazılımın hata yapmadan ne kadar süreyle çalıştığını ve sistemin kararlılığını ölçen bir kriterdir. Yazılımın hatasız bir şekilde çalışması, acil durumlarda hayat kurtarıcı olabilir. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, güvenilirlik testleri, yazılımın uzun süreli kullanımda hata vermeden çalışıp çalışmadığını belirler. Yazılımın sistem arızalarına karşı dayanıklı olup olmadığı, acil durumlarda

kesintisiz hizmet sunabilmesi için kritik bir faktördür. Güvenilirlik testleri, yazılımın başarısızlık durumlarında ne kadar hızlı toparlanabileceğini de değerlendirir [11].

Performans (Performance), yazılımın hızını ve yanıt verme süresini ölçen bir kriterdir. Yüksek performans, yazılımın hızlı çalışmasını ve yüksek veri işlem kapasitesine sahip olmasını sağlar. 112 acil çağrı merkezi yazılımı gibi yüksek trafik altında çalışan sistemlerde, performans testleri, yazılımın yoğun çağrı trafiği altında nasıl çalıştığını değerlendirir. Bu testler, yazılımın yanıt sürelerini, veri işleme hızını ve kullanıcı taleplerine ne kadar hızlı cevap verdiğini ölçer. Performans testleri, yazılımın acil durumlarda hızla yanıt verebilmesi için gereklidir [7].

Desteklenebilirlik (Supportability), yazılımın bakımının ne kadar kolay yapıldığını ve yazılımın uzun vadeli sürdürülebilirliğini değerlendirir. Yazılım geliştirme sürecinde, yazılımın bakımını ve güncellemelerini kolaylaştırmak için testler yapılmalıdır. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, desteklenebilirlik testleri, yazılımın hatalarını ne kadar hızlı bir şekilde düzeltebileceğimizi, güncelleme ve entegrasyon süreçlerinin ne kadar kolay olduğunu ölçer. Ayrıca, yazılımın gelecekteki sürümleriyle uyumlu olup olmadığını da test eder [3].

FURPS+ modelinin artı işareti, yazılımın taşınabilirlik, güvenlik, uyumluluk gibi ek kriterleri de içerdiğini gösterir. Bu ek kriterler, yazılımın çevresel faktörlere ne kadar uyum sağlayabileceğini, diğer sistemlerle ne kadar entegre olabileceğini ve sistemin güvenliğini nasıl koruyacağını değerlendirir. Özellikle 112 acil çağrı merkezlerinde, yazılımın diğer sistemlerle uyumlu çalışabilmesi, güvenliğinin sağlanması ve taşınabilir olması önemlidir. Bu tür testler, yazılımın daha geniş bir uygulama alanına sahip olmasını ve gelişen teknolojiye uyum sağlamasını garanti eder.

Sonuç olarak, FURPS+ modeli, yazılım test süreçlerinde geniş bir perspektif sunarak, yazılımın yalnızca fonksiyonel gereksinimlere değil, aynı zamanda kullanıcı memnuniyetine, sistemin güvenliğine, performansına ve uzun vadeli sürdürülebilirliğine de odaklanılmasını sağlar. Bu model, yazılımın her yönünü test ederek, daha kaliteli, güvenli ve verimli bir ürün ortaya koymayı hedeflemektedir.

2.1. Yazılım Geliştirme Döngüsü

Yazılım geliştirme döngüsü, bir yazılımın ilk tasarım aşamasından son kullanıcıya sunulmasına kadar geçen süreci kapsar. Şekil 1 ve Şekil 3’ de verilen bu döngüde yazılımın işlevselliği, performansı, güvenliği ve kullanıcı deneyimi gibi birçok faktör sürekli olarak test edilir. Yazılım geliştirme süreçlerinde testlerin nasıl entegre edileceği, yazılımın kalitesini doğrudan etkiler. Test süreçlerinin yazılım geliştirme döngüsüne doğru

şekilde dahil edilmesi, yazılımın güvenilirliğini ve verimliliğini artırır.

Yazılım geliştirme döngüsü genellikle birkaç temel aşamadan oluşur: gereksinim toplama, tasarım, geliştirme, test ve bakım. Bu aşamalarda her biri birbirini takip eden adımlar olsa da, yazılımın başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için her aşamanın doğru bir şekilde entegre edilmesi gerekmektedir. Testler, yazılım geliştirme sürecinin her aşamasında yapılmalı ve yazılımın her yönü kapsamlı bir şekilde değerlendirilmelidir. V-Model ve Agile gibi yazılım geliştirme modelleri, test süreçlerinin yazılım geliştirme sürecine entegrasyonuna yönelik sistematik bir çerçeve sunarak, yazılım kalitesinin artırılmasına ve hata tespitinin erken aşamalarda gerçekleştirilmesine olanak tanımaktadır.

V-Modeli, yazılım geliştirme sürecinde test süreçlerinin entegrasyonu için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Bu model, geliştirme sürecini iki aşamaya ayırır: sol taraf geliştirme aşamalarını (gereksinim toplama, tasarım) ve sağ taraf ise test aşamalarını (birim testi, entegrasyon testi, sistem testi ve kabul testi) içerir. V-Modeli, yazılımın her aşaması için karşılık gelen bir test aşaması belirler. Yazılım geliştirmeye başlandığında, ilk olarak gereksinimlerin belirlenmesi ardından tasarım aşamasına geçilir. Bu aşamalardan her biri, karşılık gelen testlerle birlikte planlanır. Örneğin, yazılımın her bir bileşeni için geliştirme yapılırken, buna uygun birim testleri de paralel olarak yürütülür. Sistem testi ise yazılımın tüm bileşenlerinin birlikte nasıl çalıştığını değerlendirir. Bu şekilde, test süreçleri yazılım geliştirme döngüsünün her aşamasında doğrudan yer alır [15].



Şekil 3. Yazılım geliştirme döngüsünün aşamaları

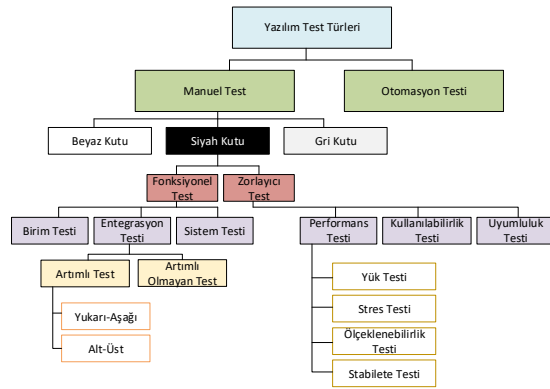
Agile yazılım geliştirme, yazılımın küçük, yönetilebilir parçalar halinde geliştirilmesini ve her parçanın test edilmesini sağlar. Agile, yazılım geliştirme sürecini kısa döngüler (sprintler) halinde organize eder ve her sprint sonunda yazılımın geliştirilmiş bir sürümü test edilir. Agile geliştirme sürecinde, yazılımın her yeni sürümünde fonksiyonellik, güvenilirlik ve performans gibi kriterler sürekli olarak test edilir. Agile, yazılımın hızla değişen gereksinimlere adapte olabildiğini sağlar. Testler ise her iterasyonda yapılır, bu sayede yazılım geliştirme sürecine entegre edilmiş sürekli geri bildirim döngüsü oluşturulmuş olur. Bu, yazılımın kalitesini artırmak için oldukça etkili bir yöntemdir çünkü kullanıcı geri bildirimleri doğrultusunda yazılım sürekli olarak iyileştirilir [16].

Her iki modelde de testler, yazılım geliştirme sürecinin ayrılmaz bir parçasıdır. V-Modeli, yazılım geliştirme aşamalarıyla paralel olarak testlerin yapılmasını sağlarken, Agile modeli daha esnek bir yaklaşım sunarak, her sprint sonunda testlerin tekrar yapılmasını ve yazılımın sürekli olarak iyileştirilmesini sağlar.

Yazılım geliştirme döngüsüne test süreçlerinin entegre edilmesi, yazılımın her yönünün güvenli, kullanıcı dostu ve hatasız olmasını sağlar. Özellikle 112 acil çağrı merkezi gibi kritik öneme sahip sistemlerde, bu süreçlerin titizlikle yönetilmesi gerekir. Her iki modelde, yazılım geliştirme sürecinde testlerin doğru zamanda ve doğru şekilde yapılmasını sağlayarak, yazılımın son kullanıcıya en yüksek kalitede sunulmasına katkı sağlar.

2.2. Yazılım Testi Türleri

Yazılım testi, bir yazılımın kalitesini ve işlevselliğini değerlendirmek için kullanılan önemli bir süreçtir. Şekil 4' de gösterilen test türleri, yazılımın farklı yönlerini test etmek için kullanılır ve her birinin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır.



Şekil 4. Yazılım testi türleri

Bazı önemli test türleri şunlardır:

- **Manuel Test:** Bu test türünde, testler insanlar tarafından manuel olarak gerçekleştirilir. Beyaz kutu testi, kara kutu testi ve gri kutu testi gibi farklı koşullarda bu test uygulanabilir.
- **Otomatik Test:** Bu test türünde, testler otomatik araçlar tarafından gerçekleştirilir. Otomatik test, manuel testten daha hızlı ve daha verimli olabilir, ancak daha fazla önceden planlama ve kurulum gerektirir.
- **Duman Testi:** Bu test türünde, yazılımın temel işlevleri düzgün çalışıp çalışmadığını hızlı bir şekilde kontrol etmeyi amaçlar. Bu test ile bir sonraki geliştirme aşamasına hazır olup olunmadığı test edilmiş olur.
- **Akal Sağlığı Testi:** Bu test türünde, yazılımın beklenen şekilde davrandığını ve beklenmedik hatalar içermediğini doğrulamak için temel işlevler test edilir.

- **Gerileme Testi:** Bu test türünde, yeni bir değişikliğin var olan işlevselliği bozmadığından emin olmak için eski testler tekrar çalıştırılır.
- **Kullanıcı Kabul Testi:** Bu test türünde, yazılımın nihai kullanıcılar tarafından test edilmesi ve kabul kriterlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemesi sağlanır.
- **Güvenlik Testi:** Bu test türünde, yazılımdaki güvenlik açıkları ve zafiyetler aranır.
- **Küreselleşme Testi:** Bu test türünde, yazılımın farklı dilleri, kültürleri ve bölgeleri destekleyip desteklemediği test edilir.
- **FURPS+ Testi:** Yazılımın işlevsellik, kullanılabilirlik, güvenilirlik, performans ve desteklenebilirlik gibi temel kalite kriterlerini değerlendiren bir test türüdür. Ek olarak, **güvenlik, ölçeklenebilirlik, uyumluluk ve sürdürülebilirlik** gibi ek faktörler de "+" kapsamında ele alınır.

Yazılım testi için hangi test türlerinin kullanılacağı, projenin boyutuna, karmaşıklığına ve risklerine bağlıdır. En iyi sonuçlar için, genellikle birden fazla test türü kullanılır [14].

2.3. Yazılım Test Süreçleri

Yazılım test süreci, bir yazılımın ne kadar iyi çalıştığını ve gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için kullanılan bir dizi adımdır. Bu süreç, yazılımın kalitesini ve güvenilirliğini artırmak, hataları erken aşamada bulmak ve müşteri memnuniyetini sağlamak için önemlidir [15]. Testin hangi amaç ile yapıldığı belirlemelidir. Birim test midir, geliştirme testi midir, kabul testi midir, tip testi midir? Ona göre aşağıdaki adımlar belirlenebilir.

Yazılım test süreci genel olarak şu adımları içerir:

1. Planlama: Test planı oluşturma aşaması, bir projenin başarılı bir şekilde test edilmesi için kritik önem taşır. Bu aşamada, test edilecek yazılımın veya sistemin kapsamı ve hedefleri net bir şekilde tanımlanır. Amaca göre gerekli yöntemler (okuyarak, manuel koşulu, otomatik koşulu), test derinliği (beyaz, gri, kara kutu testleri), test araçları, ekipman ve personel gibi kaynaklar belirlenir ve tahsis edilir. Son olarak, testlerin gerçekleştirileceği ortam kurulur ve hazır hale getirilir. Bu aşamadaki tüm planlama ve hazırlık çalışmaları, testlerin sorunsuz ve verimli bir şekilde yürütülmesine zemin hazırlar.

2. Tasarım: Test senaryoları tasarlama aşaması, test planında belirlenen hedeflere ulaşmak (V Chart'a göre daha tasarım aşamasında bunlar belirlenmiş olmalıdır) için gerekli adımları ve kontrolleri detaylandırır. Bu aşamada, her bir test senaryosu için önkoşullar, adımlar, beklenen sonuçlar ve değerlendirme kriterleri tanımlanır. Test verileri, test senaryolarına uygun şekilde hazırlanır ve organize edilir. Kullanıcı dostu test araçları ve metodolojileri seçilerek testlerin

otomatikleştirilmesi ve verimliliği artırılır. Bu aşamadaki çalışmalar, testlerin kapsamlı ve doğru bir şekilde yürütülmesini sağlar.

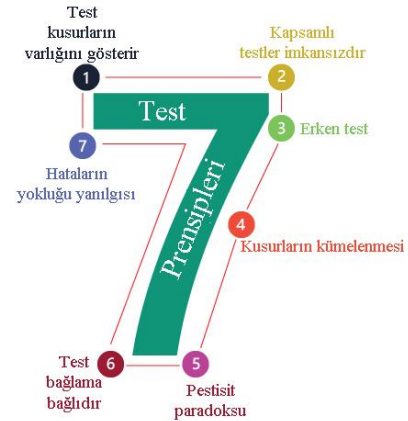
3. Uygulama: Test senaryolarının yürütülmesi aşaması, planlanmış test senaryolarının sırayla ve eksiksiz bir şekilde gerçekleştirildiği aşamadır. Bu aşamada, test uzmanları her bir test senaryosunu manuel veya otomatik olarak çalıştırır. Beklenen sonuçlarla gerçek sonuçlar karşılaştırılır ve herhangi bir tutarsızlık veya hata durumunda detaylı raporlar hazırlanır. Raporlarda, hataların tanımı, tekrar gözlenmesini sağlayacak adımları, ekran görüntüleri ve diğer ilgili bilgiler yer alır. Amaca göre düzeltici faaliyet için sonuç dokümanı hazırlanabilir, istisnası birim testidir. Bu sayede, geliştiriciler hataları analiz edebilir ve gerekli düzeltmeleri yapabilir.

4. Doğrulama: Hata düzeltme ve doğrulama aşaması, test sürecinin son aşamasıdır. Bu aşamada, test sırasında raporlanan hatalar geliştiriciler tarafından analiz edilir ve gerekli düzeltmeler yapılır. Düzeltmelerin ardından, test senaryoları tekrar yürütülerek hataların düzeltildiği doğrulanır. Test senaryoları tavsiye olarak tamamen, kesintisiz olarak yürütülmelidir. Gerileme testinin raporlama öncesinde uygulanması, sürecin güvenilirliğini etkileyebilir ve dikkatle ele alınmalıdır. Son olarak, yazılımın tüm kabul kriterlerini karşıladığından ve üretim ortamına hazır olduğundan emin olunur. Bu aşamada yapılan titiz çalışmalar, yazılımın kalitesini ve güvenilirliğini artırır. Tespit edilen hatalar düzeltilir.

5. Raporlama: Test sonuçlarının raporlanması aşaması, test sürecinin tamamlanmasından sonra elde edilen bulguları ve önerileri raporlama aşamasıdır. Bu aşamada, test planı, test senaryoları, yürütülen testler, karşılaşılan hatalar, yapılan düzeltmeler ve elde edilen tüm veriler kapsamlı bir şekilde raporlanır. Raporlar, ilgili paydaşlarla paylaşılır ve yazılımın genel durumu, performansı ve kalitesi hakkında bilgi verilir. Ayrıca, gelecekteki geliştirmeler için önerilerde bulunulur. Bu sayede, paydaşlar yazılımın durumunu şeffaf bir şekilde görebilir ve gerekli adımları alabilirler.

Yazılım test süreçleri, yazılımın kalitesini sağlamak ve hatalarını erken aşamalarda tespit etmek amacıyla yapılan bir dizi değerlendirme aşamasıdır. Bu test süreçleri genellikle farklı seviyelerde yapılır ve her seviyede farklı hedeflere ulaşmaya çalışılır. Şekil 5'te, yazılım test süreçlerinde temel kabul edilen yedi test ilkesi şematize edilmiştir: (1) Test kusurlarının varlığını gösterir, (2) Kapsamlı testler imkânsızdır, (3) Erken test, (4) Kusurların kümelenmesi, (5) Pestisit paradoksu, (6) Test bağlama bağıdır ve (7) Hataların yokluğu yanılgısı. Bu prensipler, test süreçlerinin etkinliğini artırmak ve yazılım kalitesini iyileştirmek için rehber niteliği taşımaktadır. Yazılım test süreçleri, bu ilkeler doğrultusunda dört temel seviyede yürütülmektedir: Birim Testi, Entegrasyon Testi, Sistem Testi ve Kabul Testi. Her bir test seviyesi, yazılımın belirli bir yönünü değerlendirerek, geliştirme

sürecinin her aşamasında kaliteyi güvence altına almak için kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 5. Yedi farklı test ilkesi

Birim testi (Unit Testing), yazılım geliştirme sürecinin en temel test seviyesidir ve genellikle yazılımın en küçük bileşenlerini, yani fonksiyonları, metodları veya sınıfları test etmek için kullanılır. Birim testleri, yazılımın her bir bileşeninin doğru şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Yazılımın her modülü, diğer modüllerden bağımsız olarak test edilmelidir. Bu testlerin amacı, her bir bileşenin belirlenen işlevleri doğru şekilde yerine getirip getirmediğini doğrulamaktır. Örneğin, 112 acil çağrı merkezi yazılımında, birim testleri, çağrı yönlendirme fonksiyonunun doğru çalışıp çalışmadığını test edebilir. Bu testler, yazılım geliştirme sürecinin başında yapılmalı ve yazılımın her bileşeninin hatasız olmasını sağlamalıdır [15].

Entegrasyon testi (Integration Testing), yazılımın farklı bileşenlerinin birbirleriyle uyum içinde çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Birim testlerinde bağımsız olarak test edilen bileşenler, entegrasyon testinde bir araya getirilir ve sistemin tüm parçalarının birbirleriyle nasıl etkileşime girdiği değerlendirilir. Bu test türü, özellikle yazılımın birden fazla modül veya servis içerdiği durumlarda önemlidir. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, entegrasyon testleri, çağrı alma, yönlendirme ve veritabanı işlemleri gibi farklı modüllerin uyumlu çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Bu seviyede yapılan testler, sistemin bileşenleri arasındaki veri akışının doğruluğunu ve uyumluluğunu değerlendirir [16].

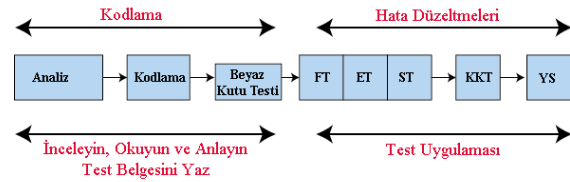
Sistem testi (System Testing), yazılımın tüm bileşenlerinin bir arada çalışıp çalışmadığını ve tüm sistemin genel olarak belirtilen gereksinimleri karşılayıp karşılamadığını test eder. Sistem testi, yazılımın entegrasyon aşamasından sonra yapılır ve yazılımın toplam işlevselliğini değerlendirir. Bu test, yazılımın her yönünü kapsar ve genellikle yazılımın tüm modüllerinin bir arada çalıştığı senaryolar üzerinden gerçekleştirilir. 112 acil çağrı merkezi

yazılımında, sistem testleri, çağrı alma, yönlendirme, veri işleme ve sonuç raporlama gibi tüm süreçlerin doğru bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Sistem testi, yazılımın kullanıcı senaryoları altında nasıl çalıştığını ve tüm işlevlerin birlikte nasıl performans gösterdiğini ölçer [3].

Kabul testi (Acceptance Testing), yazılımın son kullanıcı gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını değerlendirmek için yapılan son test aşamasıdır. Bu test, yazılımın müşteri veya kullanıcılar tarafından kabul edilmeden önce yapılır ve genellikle gerçek kullanıcıların test senaryoları üzerinde gerçekleştirilir. Kabul testinin amacı, yazılımın belirtilen işlevleri doğru şekilde yerine getirip getirmediğini, kullanıcı gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını tespit etmektir. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, kabul testleri, yazılımın operatörler tarafından nasıl kullanılacağı, çağrıların doğru bir şekilde yönlendirilip yönlendirilmediği gibi unsurlar üzerinden yapılır. Kullanıcı geri bildirimlerine dayalı olarak yapılan bu testler, yazılımın son kullanıcı tarafından kabul edilip edilmeyeceğini belirler [17].

Her bir test seviyesi, yazılımın farklı bir yönünü hedef alır ve yazılımın her bileşeninin veya tüm sistemin hatasız çalışmasını sağlamaya yardımcı olur. Bu testler, yazılımın kalite seviyesini yükseltir, hataları erkenden tespit eder ve yazılımın son kullanıcıya en yüksek kalitede sunulmasını sağlar. 112 acil çağrı merkezi gibi kritik öneme sahip yazılımlarda, her seviyedeki testlerin etkin bir şekilde yapılması, yazılımın güvenli, hızlı ve hatasız çalışmasını garanti eder.

Test senaryoları, yazılımın doğru çalışıp çalışmadığını değerlendirmek için oluşturulan önemli araçlardır. Bu senaryolar, yazılımın işlevselliğini, güvenliğini, performansını ve kullanıcı deneyimini test etmek için belirli adımları içerir. Test senaryoları, yazılım geliştirme sürecinde yazılımın beklenen gereksinimlere göre nasıl çalıştığını doğrulamak amacıyla yapılır. Senaryo geliştirme sürecinde ilk adım, yazılımın tüm gereksinimlerini doğru şekilde anlamak ve bu gereksinimlere dayanarak test senaryoları oluşturmak olmalıdır. Her test senaryosu, yazılımın belirli bir fonksiyonunu ya da özelliğini test etmek için tasarlanmalıdır. Özellikle, 112 acil çağrı merkezi yazılımı gibi kritik sistemlerde, test senaryolarının gerçekçi olması büyük önem taşır. Bu tür yazılımlarda, senaryolar yalnızca normal kullanım senaryolarını değil, aynı zamanda olağanüstü durumları ve hatalı girişleri de kapsamalıdır. Örneğin, bir test senaryosu, bir acil durumda, yazılımın çağrıyı doğru bir şekilde alıp almadığını, veritabanı işlemlerinin doğru yapıp yapılmadığını ve çağrının doğru birime yönlendirilip yönlendirilmediğini kontrol edebilir [1].

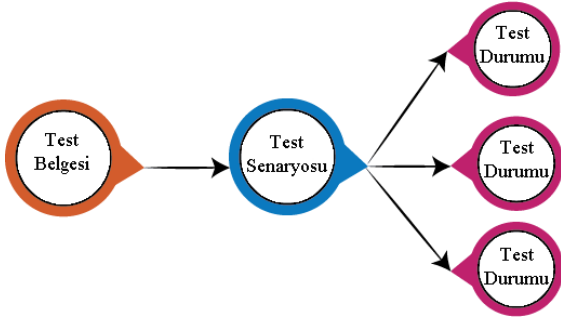


Şekil 6. Test yürütme süreci

Test senaryoları geliştirilirken, kapsamlı olmalarına özen gösterilmelidir. Yazılımın tüm yönlerinin test edilmesi, olası hataların erken aşamalarda tespit edilmesine olanak sağlar. Bu, yazılımın tüm işlevlerinin doğru şekilde çalıştığını ve kullanıcıların yazılımı en verimli şekilde kullanabildiğini garanti altına alır. Ayrıca, senaryoların oluşturulmasında yazılımın gereksinimlerinin tam olarak anlaşılması çok önemlidir. Her test senaryosunun, yazılımın hangi özelliğini test ettiği, bu testin ne amaçla yapıldığı ve beklenen sonuçların ne olduğu açık bir şekilde belirtilmelidir. Gereksinimlerin doğru bir şekilde belirlenmesi, testin ne kadar verimli olacağını doğrudan etkiler. 112 acil çağrı merkezi yazılımı gibi bir uygulamada, test senaryolarının her zaman kullanıcı geri bildirimlerine dayalı olarak oluşturulması ve kullanıcıların acil durumlarda nasıl etkileşimde bulunacağı göz önünde bulundurulmalıdır [3]. Şekil 6' da Test yürütme süreci gösterilmiştir. Testlerin başarılı olabilmesi için, her senaryo belirli adımlarla test edilen işlevi izlemeli ve yazılımın tüm işlevsel gereksinimlerini kapsamalıdır. Bu şekilde, yazılımın tüm bileşenlerinin uyum içinde çalışıp çalışmadığı anlaşılabilir.

Son olarak, test senaryolarının oluşturulmasında dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus, senaryoların gerçekçi ve tekrarlanabilir olmasıdır. Yazılımın her güncel sürümünde testlerin doğru bir şekilde yapılabilmesi için senaryoların doğru ve anlaşılır bir şekilde yazılması gerekir. Testlerin her birinin belirli bir hedefi olmalı ve test sonuçları yazılımın gereksinimlerine uygun olarak doğru bir şekilde değerlendirilmelidir. Bu sürecin sonunda elde edilen test senaryoları, yazılımın eksiksiz ve hatasız bir şekilde çalışıp çalışmadığını değerlendirmek için çok değerli bir araç olacaktır [15].

Yazılım test süreçlerinde kullanılan teknikler, yazılımın her yönünü detaylı bir şekilde değerlendirmeyi sağlar. Bu teknikler, testin kapsamını genişletmek, hataları erken tespit etmek ve yazılımın kaliteli olmasını sağlamak için kullanılır. Test senaryoları için yaygın olarak kullanılan tekniklerden bazıları black-box testi, white-box testi, grey-box testi ve eşleme testi gibi yöntemlerdir. Bu tekniklerin her biri, yazılımın farklı yönlerini ve işlevlerini test etme amacı taşır ve her birinin avantajları bulunmaktadır. Şekil 7' de Test senaryo süreci gösterilmiştir.



Şekil 7. Test senaryosu süreci

Black-box testi, yazılımın iç yapısına dair hiçbir bilgiye sahip olmadan, yalnızca dışa açık işlevlerin doğruluğunu test etmeye odaklanır. Bu teknik, yazılımın kullanıcı tarafından görülebilen işlevlerinin doğru çalışıp çalışmadığını kontrol eder. Örneğin, 112 acil çağrı merkezi yazılımında, black-box testi çağrı yönlendirme, veri giriş çıkışları ve kullanıcı etkileşimlerinin doğruluğunu kontrol etmek için kullanılır. Bu teknik, yazılımın dışa dönük işlevselliğini test ederken, geliştiricinin yazılımın iç yapısına dair bilgi sahibi olmasına gerek bırakmaz ve özellikle kullanıcı deneyiminin değerlendirilmesi açısından büyük avantaj sağlar [1].

White-box testi, yazılımın iç yapısına dair ayrıntılı bilgiye sahip olarak yapılan testtir. Bu testte, yazılımın kaynak kodu, algoritmalar ve mantıksal akış detaylı bir şekilde incelenir. White-box testi, yazılımın her satırını ve fonksiyonunu gözden geçirerek, yazılımdaki potansiyel hataları bulmaya çalışır. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, white-box testi, yazılımın çağrı yönlendirme algoritmalarının doğru çalışıp çalışmadığını, veri işleme süreçlerinin düzgün yapıp yapılmadığını kontrol etmek için kullanılabilir. Bu teknik, yazılımın derinlemesine analiz edilmesini sağlar ve küçük hataların bile tespit edilmesine yardımcı olur [15].

Bir diğer teknik olan grey-box testi, black-box ve white-box testlerinin birleşimidir. Bu teknik, yazılımın iç yapısı hakkında sınırlı bilgiye sahip olmayı gerektirir ve hem dış işlevler hem de iç mantık üzerinde testler yapar. Grey-box testi, yazılımın hem işlevsel gereksinimlerini hem de iç süreçlerini göz önünde bulundurarak daha kapsamlı testler yapılmasını sağlar. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, grey-box testi, kullanıcı arayüzünü test ederken aynı zamanda yazılımın iç veri akışını da gözden geçirebilir. Bu, yazılımın her iki yönünü birleştirerek kapsamlı bir test süreci sunar [16].

Son olarak, eşleme testi (equivalence partitioning), test edilen yazılımın giriş değerlerinin belirli sınıflara ayrılarak her bir sınıftan bir değer seçilmesi esasına dayanır. Bu test, her bir girişin doğru şekilde işlendiği ve yazılımın bu farklı girişlere uygun tepkileri verdiği durumları kapsar. 112 acil çağrı merkezi yazılımında, eşleme testi, farklı acil durum türleri (yangın, trafik

kazası vb.) ile yazılımın doğru tepki verip vermediğini test edebilir. Bu yöntem, gereksiz testleri ortadan kaldırarak daha verimli test senaryoları oluşturmaya olanak sağlar [11].

Bu test teknikleri, yazılımın her yönünü kapsamlı bir şekilde test etmeyi mümkün kılar ve yazılımın kalitesini artırmada önemli bir rol oynar. Black-box testi, kullanıcı odaklı fonksiyonları test ederken, white-box testi yazılımın iç işleyişini inceler. Grey-box testi, her iki yaklaşımın birleşimini kullanarak yazılımı daha geniş bir açıdan değerlendirir, eşleme testi ise girişlerin doğru işlendiğinden emin olmak için etkili bir yöntemdir. Her bir test tekniği, yazılımın eksikliklerini tespit etmek ve daha güvenilir, kullanıcı dostu bir yazılım geliştirmek için kullanılmalıdır.

Test senaryolarının yönetimi, yazılım test süreçlerinin etkinliğini sağlamak ve yazılımın kalitesini güvence altına almak için kritik bir öneme sahiptir. Test senaryolarının doğru bir şekilde yönetilmesi, yazılım geliştirme sürecinde hataların erkenden tespit edilmesine ve düzeltilmesine olanak tanır. Etkili bir test yönetimi, sadece testlerin düzenli bir şekilde yürütülmesiyle ilgili değildir; aynı zamanda test sonuçlarının izlenmesi, analizi ve yazılımın her yönünü kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi gereklidir. Testlerin düzenli ve etkili bir şekilde yürütülmesi için her aşamanın dikkatlice planlanması ve her testin amacına uygun olarak yapılması gerekir. Şekil 8’ de Test planlı bileşenleri verilmiştir. Bu süreç, yazılımın her bir fonksiyonunun, özelliğinin ve kullanıcının gereksinimlerinin doğru bir şekilde test edilmesini sağlamalıdır.



Şekil 8. Test planı bileşenleri veya nitelikleri

Test senaryolarının yönetiminde ilk adım, test planlarının oluşturulmasıdır. Test planı daha önce tanımlandığı üzere, hangi testlerin yapılacağını, hangi araçların kullanılacağını, testlerin hangi sıklıkla gerçekleştirileceğini ve sonuçların nasıl izleneceğini belirlemektedir. Bu plan, test sürecinin başlangıcında yazılım geliştirme ekibi ve test ekibi arasında ortak bir anlayış oluşturur ve sürecin her aşamasında takip edilmesini sağlar. Test senaryolarının yönetimi, yazılım geliştirme süreci boyunca sürekli olarak gerektirdiğinden, her testin önceden belirlenmiş bir zaman çizelgesine ve sıralamaya göre yürütülmesi önemlidir. Bu yaklaşım, testlerin etkili bir şekilde yürütülmesini ve her bir testin ne zaman

memnuniyeti ve yazılımın performansı arasındaki ilişkiyi analiz etmek amacıyla frekans analizi, regresyon analizi ve ANOVA gibi yöntemler kullanılmıştır. ANOVA, farklı grupların (örneğin, yaş grupları, kurumlar, cinsiyet gibi) yazılım memnuniyetine olan etkisini değerlendirmek için kullanılan güçlü bir analiz yöntemidir [5]. Bu analizler sayesinde, yazılımın performansı üzerinde etkili olan faktörler belirlenmiş ve kullanıcıların hangi özelliklerden daha fazla memnun oldukları ortaya konmuştur.

Araştırma modeli ve yöntemi, 112 acil çağrı merkezi uygulamasının işlevselliğini ve kullanıcı memnuniyetini etkileyen faktörleri kapsamlı bir şekilde analiz etmeyi hedeflemektedir. Nicel veri toplama ve analiz yöntemlerinin kullanılması, elde edilen bulguların objektif ve güvenilir olmasını sağlamaktadır.

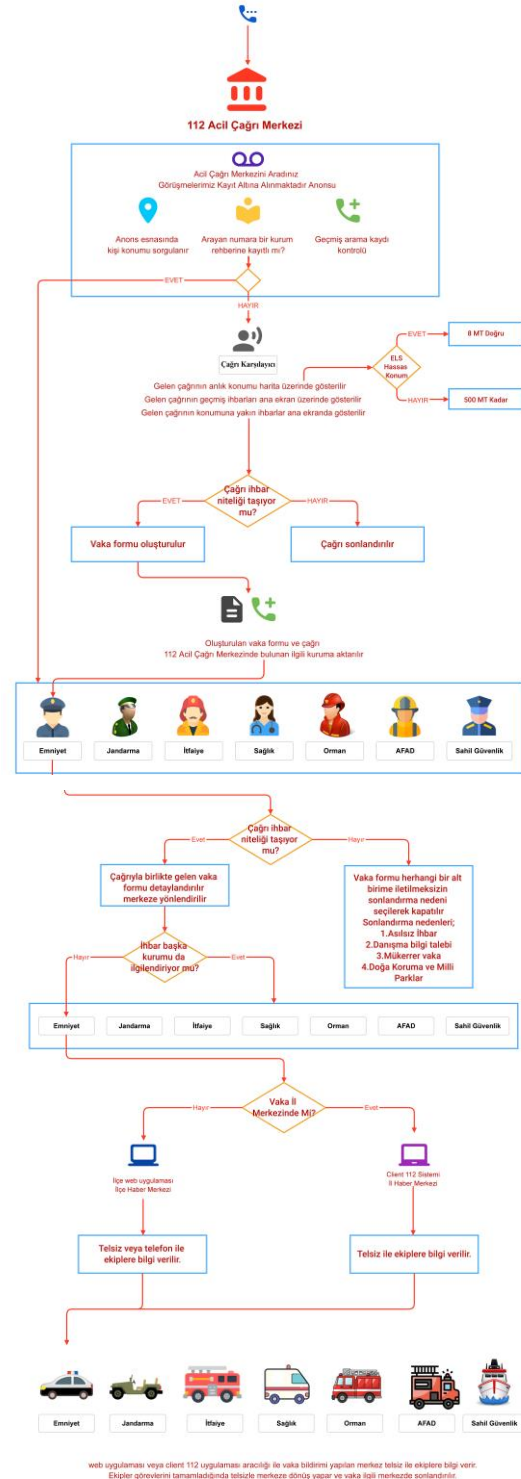
3.2. Test Senaryolarının Oluşturulması

Test senaryoları, yazılımın doğru ve etkili bir şekilde çalıştığından emin olmak için kullanılan temel araçlardır. 112 acil çağrı merkezi uygulaması gibi kritik yazılımlarda, test senaryolarının oluşturulması, yazılımın güvenilirliğini ve işlevselliğini doğrulamak için büyük önem taşır. Test senaryoları, yazılımın her türlü kullanım senaryosuna göre tasarlanarak, yazılımın tüm potansiyel kullanım durumlarıyla uyumlu olması sağlanır.

Çalışma kapsamında oluşturulan test senaryoları, 112 Acil Çağrı Merkezi Uygulaması'nın işlevselliğini ve kullanıcı deneyimini değerlendirmek amacıyla tasarlanmış olup, bu süreçte kullanıcı geri bildirimleri ve sistemin temel fonksiyonlarının doğrulanması esas alınmıştır. Çalışma kapsamında güvenlik ve performans testleri doğrudan gerçekleştirilmemiştir; ancak anket sonuçları, sistemin kullanıcı beklentilerini ne ölçüde karşıladığını ve mevcut eksiklikleri ortaya koymada önemli bir rol oynamaktadır. Testlerin yeniden uygulanması çalışmanın mevcut kapsamı ve metodolojisi gereği mümkün olmadığından, gelecekte yapılacak araştırmalarda zorlayıcı hata senaryoları, güvenlik analizleri ve performans değerlendirmeleri gibi ek testlerin dahil edilmesi önerilmektedir. Bu sayede, sistemin yüksek trafik altındaki dayanıklılığı, hata toleransı ve güvenlik açıkları gibi kritik faktörler daha ayrıntılı olarak ele alınabilmektedir.

Her test senaryosu, yazılımın belirli bir fonksiyonunu test etmeye yönelik spesifik adımlar içerir. Bu adımlar, yazılımın doğru şekilde çalışıp çalışmadığını değerlendiren bir dizi işlemi kapsar. Örneğin, 112 acil çağrı merkezi uygulamasında, kullanıcıların çağrıları doğru birimlere yönlendirmesi, yazılımın hızlı bir şekilde yanıt vermesi ve acil durum verilerinin doğru bir şekilde işlenmesi gibi işlevler test edilen unsurlar arasında yer alır. Bu faktörler dikkate alınarak, test senaryoları oluşturulmuş ve yazılımın çeşitli koşullarda

nasıl performans gösterdiği kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Test senaryoları yalnızca yazılımın işlevselliğini değil, aynı zamanda kullanıcı deneyimini de ortaya çıkarmak için oluşturulmuştur.



Şekil 11. 112 acil çağrı uygulamasının akış şeması

Şekil 11’de 112 Acil Çağrı Merkezleri ve yeni nesil 112 uygulamasına ilişkin bir akış şeması gösterilmiştir. Akış şeması, 112 numarasına gelen bir acil durum çağrısının nasıl ele alındığını ve ilgili ekiplere nasıl yönlendirildiğini gösterir. Bu sistemde, 112 numarasına gelen acil durum çağrısı, otomatik olarak olay tipi ve konuma göre ilgili birimlere yönlendirilir. Çağrıyı değerlendiren ilgili birimler, olay yerine en uygun ekipleri sevk eder ve ekipler olay mahalline ulaşarak gerekli müdahaleyi yapar. Tüm bu süreç, çağrı merkezi tarafından izlenir ve kaydedilir.

Bu sistem sayesinde, acil durum müdahalesi önemli ölçüde hızlandırılmış ve optimize edilmiştir. Vatandaşlar tek bir numarayı arayarak yardım alabilir ve ilgili ekipler daha kısa sürede olay yerine ulaşarak gerekli müdahaleyi yapabilmektedir. Bu sayede can kaybı ve yaralanmaların önüne geçilmesi ve maddi hasarların en aza indirilmesi amaçlanmaktadır.

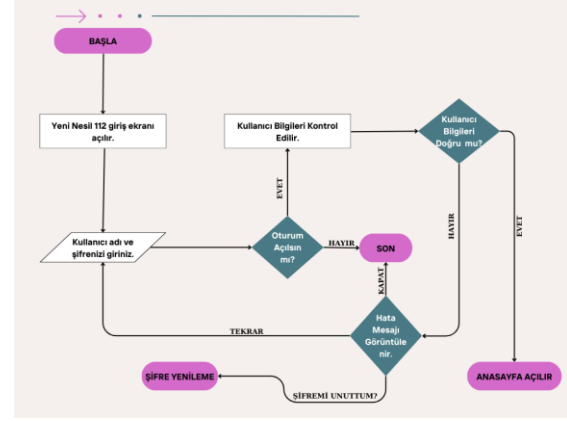
3.3. Test Senaryoları Uygulama Süreci

Bu çalışmada, 112 acil çağrı merkezi uygulamasının işlevselliğini değerlendirmek için beş farklı test senaryosu oluşturulmuş ve uygulanmıştır. İlk dört test senaryosu, kullanıcı arayüzüne yönelik testler olup uygulama üzerinde doğrudan gerçekleştirilen testlerdir. Bu testler sırasında, kullanıcıların yazılımı nasıl kullandıkları ve yazılımın her bir fonksiyonel bileşeninin nasıl çalıştığı gözlemlenmiş ve belgelenmiştir. Beşinci test senaryosu ise performans testi olup, sistemin büyük veri yükü altında nasıl çalıştığına dair veriler toplamak amacıyla yapılmıştır. Her bir test senaryosunun amacı ve kapsamı Tablo 1’de açıklanmıştır.

Tablo 1. Test senaryoları amaç ve kapsam tablosu

No	Amaç	Kapsam
T1	Kullanıcıların doğru giriş yapmalarını sağlamak	Kullanıcı adı ve şifre doğrulama işlevleri, hata mesajları ve güvenlik önlemleri.
T2	Gelen çağrıların doğru şekilde karşılanması	Çağrı numarası sorgulama, konum tespiti ve doğru birime yönlendirme
T3	Vaka formu oluşturulması ve doğru verilerin eklenmesi	Vaka bilgileri girilmesi, doğru kurumlarla paylaşılması ve takip edilmesi
T4	Vaka formunun doğru birime yönlendirilmesi	Vaka formunun doğru birime yönlendirilmesi, doğrulama yapılması
T5	Yazılım performanslarının değerlendirilmesi	Yoğun çağrı yükü altında yazılımın kesintisiz çalışması ve performans testi yapılması

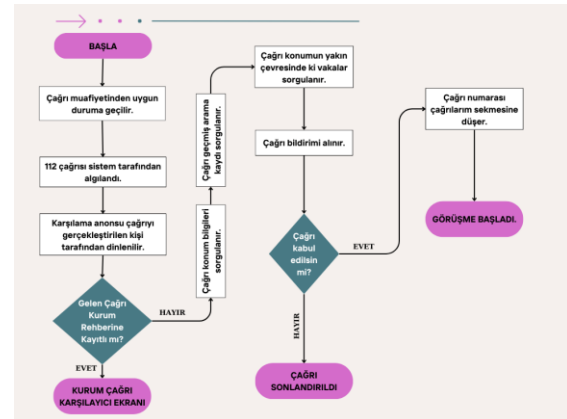
inceleme şablonuna uygun olarak ilk senaryo, kullanıcıların doğru kimlik bilgileriyle giriş yapmalarını sağlamak amacıyla giriş ekranının doğruluğunu test etmiştir. Kullanıcı adı ve şifre doğrulama işlevselliği kontrol edilerek, yazılımın güvenlik önlemleri ve kullanıcı doğrulama süreçleri incelenmiştir.



Şekil 12. Test senaryosu 1 akış diyagramı

Test Senaryosu Adı	Client-2.2.44-NG112-Giriş				
Test Senaryosu Türü	Fonksiyonel Test				
Gereksinim Numarası	-				
Modül	Giriş				
Durum	Kritik				
Sürüm	2.2.44				
Önkoşul	Bir giriş gerekli				
Test Verisi	Kullanıcı adı – 98678220080, parola – Test01				
Özet	Orturum açma işlevini kontrol etmek için				
Adım No	Açıklama	Beklenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç	Durum	Yorumlar
1	Kullanıcı adı ve şifre girilir	Kullanıcı bilgileri girilmeli	Beklenildiği gibi	Geçti	
2	Giriş yapılır	Kullanıcı başarılı giriş yapmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
3	Hatalı giriş yapılırsa hata mesajı görünür	Hata mesajı görüntülenmeli	Beklenildiği gibi	Geçti	
4	Geçerli giriş sonrası ana sayfaya yönlendirilir	Ana sayfa açılmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
Yazar	Test Analisti				
Tarih	1.1.2025				

Şekil 13. Test senaryosu 1 inceleme şablonu



Şekil 14. Test senaryosu 2 akış diyagramı

Şekil 12’ de Test Senaryosu 1 akış diyagramı verilmiştir. Şekil 13’de verilen Test Senaryosu 1

Şekil 14’ de akış diyagramı ve Şekil 15’de inceleme şablonu verilen şekilde karşılanıp, sistemin tüm birimlerle entegrasyonunu sağlamayı amaçlamıştır. Bu test, çağrılarının doğru bir şekilde yönlendirilip, konum bilgileri gibi kritik verilerin doğru şekilde kaydedilip edilmediğini kontrol etmiştir.

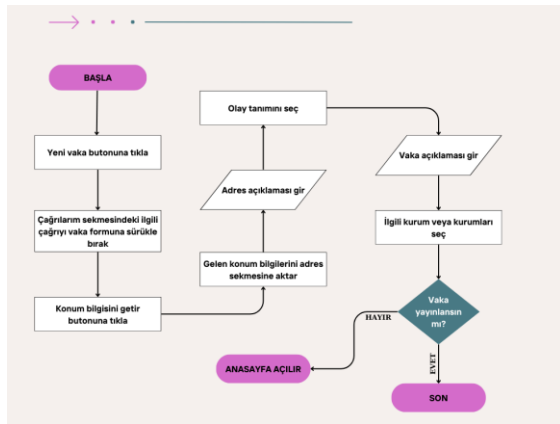
Test Senaryosu Adı	Client-2.2.44-NG112-ÇK Ana Ekranı
Test Senaryosu Türü	Fonksiyonel Test
Gereksinim Numarası	-
Modül	Çağrı karşılayıcı ana ekranı
Durum	Kritik
Sürüm	2.2.44
Önkoşul	Çağrı gerçekleştirme
Test Verisi	Telefon numarası – 0537 627 5186
Özet	Gelen çağrı bilgilerini görme

Adım No	Açıklama	Beklenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç	Durum	Yorumlar
1	Çağrı alınır	Çağrı başarıyla alınmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
2	Numara doğrulama yapılır	Numara doğrulaması yapılmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
3	Konum doğrulaması yapılır	Konum doğrulaması yapılmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
4	Çağrı yönlendirilir	Çağrı doğru birime yönlendirilir	Beklenildiği gibi	Geçti	

Yazar	Test Analisti
Tarih	2.1.2025

Şekil 15. Test senaryosu 2 inceleme şablonu

Şekil 16’da üçüncü test senaryosu verilen, çağrı karşılayıcıların yeni vaka formlarını doğru bir şekilde oluşturup, bu bilgileri doğru birimlere yönlendirmelerini test etmeyi amaçlamıştır. Şekil 17’de şablonu verilen senaryoda, kullanıcıların vaka oluşturma sürecindeki doğruluğu, eksiksiz veri girişi yapıp yapmadıkları değerlendirilmektedir.



Şekil 16. Test senaryosu 3 akış diyagramı

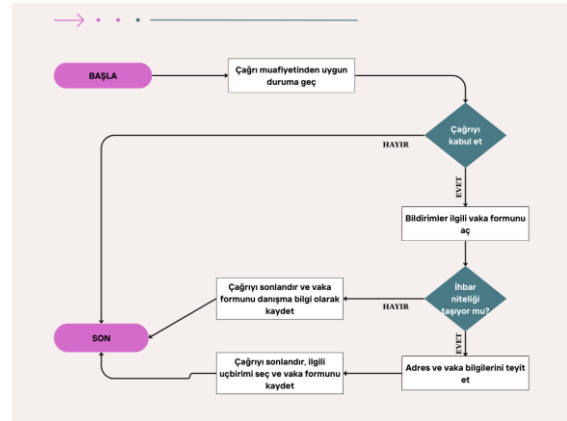
Test Senaryosu Adı	Client-2.2.44-NG112-ÇK Vaka Ekranı
Test Senaryosu Türü	Fonksiyonel Test
Gereksinim Numarası	-
Modül	Çağrı karşılayıcı vaka ekranı
Durum	Kritik
Sürüm	2.2.44
Önkoşul	Çağrı ihbar niteliği taşıyor mu?
Test Verisi	Telefon numarası – 0537 627 5186
Özet	Vaka formu oluşturma veya çağrı sonlandırma

Adım No	Açıklama	Beklenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç	Durum	Yorumlar
1	Yeni vaka oluşturulur	Vaka formu açılmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
2	Veriler girilir	Veriler doğru girilmeli	Beklenildiği gibi	Geçti	
3	Veriler doğrulanır	Veriler doğrulanmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
4	Vaka kaydedilir ve iletilir	Vaka ilgili kurumlara iletilmeli	Beklenildiği gibi	Geçti	

Yazar	Test Analisti
Tarih	3.1.2025

Şekil 17. Test senaryosu 3 inceleme şablonu

Şekil 18 ve Şekil 19’da verilen dördüncü test senaryosu ise çağrı yönlendiricilerin vaka formunu doğru şekilde görüntülemelerini ve vakaları ilgili birimlere iletmelerini sağlamayı hedeflemiştir. Bu test, vaka yönetimi süreçlerinin etkinliğini incelemiştir.



Şekil 18. Test senaryosu 4 akış diyagramı

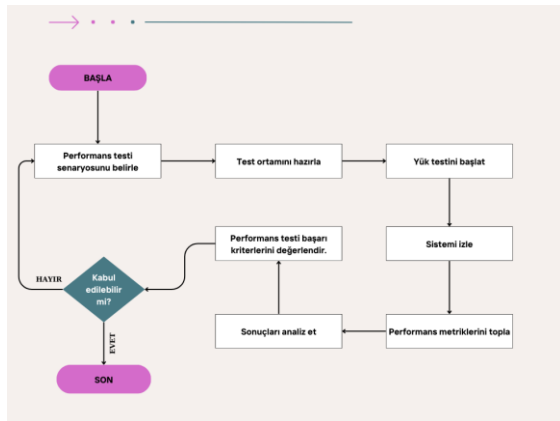
Test Senaryosu Adı	Client-2.2.44-NG112-ÇY Ana Ekranı
Test Senaryosu Türü	Fonksiyonel Test
Gereksinim Numarası	-
Modül	Çağrı yönlendirici ana ekranı
Durum	Kritik
Sürüm	2.2.44
Önkoşul	Çağrı ihbar niteliği taşıyor mu?
Test Verisi	Telefon numarası – 0537 627 5186
Özet	Çağrı ihbar niteliği taşıyor mu?

Adım No	Açıklama	Beklenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç	Durum	Yorumlar
1	Vaka formu alınır	Vaka formu görüntülenmeli	Beklenildiği gibi	Geçti	
2	Veriler doğrulanır	Veriler doğrulanmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
3	Vaka doğru birime yönlendirilir	Vaka ilgili birime yönlendirilir	Beklenildiği gibi	Geçti	

Yazar	Test Analisti
Tarih	4.1.2025

Şekil 19. Test senaryosu 4 inceleme şablonu

Beşinci ve son senaryo, uygulamanın performansını test etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 20-21). Bu senaryo, yazılımın yoğun veri trafiği ve yüksek kullanıcı yükü altında nasıl performans gösterdiğini değerlendirmiş ve sistemin kesinti, donma veya yavaşlama yaşayıp yaşamadığını analiz etmiştir. Ölçülebilir kriterler çerçevesinde, testler günlük gözlenen ortalama yükün iki katı ve en kötü senaryo koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin bu koşullarda güvenilirliğini ve performansını değerlendirmenin yanı sıra, kullanıcı memnuniyeti üzerindeki etkisini de ortaya koymaktadır. Eğer test bulguları, memnuniyet seviyelerinin düşmesine neden oluyorsa, bu parametrelerin iyileştirilmesi yazılım optimizasyonu açısından kritik hale gelmektedir.



Şekil 20. Test senaryosu 5 akış diyagramı

Test Senaryosu Adı	Client-2.2.44-NG112-ÇY
Test Senaryosu Türü	Performans Testi
Gereksinim Numarası	-
Modül	Çağrı yönlendirici ana ekranı
Durum	Kritik
Sürüm	2.2.44
Önkoşul	
Test Verisi	İl kod – 06, Kurum kod-1, ip-1.2.3.4, tc- 11.11.11.11
Özet	Yeni vaka oluşturma, vaka yayınlama, vaka kanal yayınlama?

Adım No	Açıklama	Beklenen Sonuç	Gerçekleşen Sonuç	Durum	Yorumlar
1	Yük testi başlatılır	Yük testi sorunsuz başlatılmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
2	Sistem izlenir	Sistem stabil çalışmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
3	Performans metrikleri toplanır	Performans metrikleri doğru toplanmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	
4	Sistem stabil mi?	Sistem stabil olmalı	Beklenildiği gibi	Geçti	

Yazar	Test Analisti
Tarih	5.1.2025

Şekil 21. Test senaryosu 5 inceleme şablonu

Bu test senaryoları, yazılımın her bir fonksiyonunun doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek için kapsamlı bir şekilde tasarlanmıştır. Her bir senaryo, 112 acil çağrı merkezinin işlevselliğini ve acil durum yönetimi süreçlerini değerlendirmeyi amaçlamakta olup, yazılımın gerçek dünya koşullarındaki performansını anlamak için önemlidir.

3.4. Kullanıcı Memnuniyeti Anketi

Yeni Nesil 112 Uygulaması, acil durumlarda vatandaşların hayat kurtarıcı yardım almasına yardımcı olmak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, uygulamanın güvenilir, kullanımı kolay ve etkili olması büyük önem taşır. Uygulamanın bu hedeflere ne ölçüde ulaştığını değerlendirmek için bir kullanıcı memnuniyeti anketi yapılmıştır. Anket, kullanıcı deneyimini ve uygulamanın işlevselliğini değerlendirmek, yazılımdaki hataları ve sorunları belirlemek, geliştirme önerilerini toplamak ve kullanıcı güvenini artırmak gibi amaçlarla kullanılmıştır.

Bu memnuniyet anketi, 112 acil çağrı uygulamasını aktif olarak kullanan çeşitli profesyonel gruplara uygulanmıştır. Katılımcılar, çağrı karşılayıcılar, çağrı yönlendiriciler ve teknik personelden oluşmaktadır. Çağrı karşılayıcılar, 112 uygulamasında ön çağrıyı karşılayan valilik personelleridir. Çağrı yönlendiriciler ise 112 acil çağrı merkezlerinde görevli emniyet, sağlık, orman, itfaiye, AFAD, jandarma, sahil güvenlik gibi kurum personelleridir. Teknik personel ise 112 acil çağrı merkezlerinde teknik destek veren valilik çalışanlarıdır.

Tablo 2’ de verilen anket, kullanıcıların yazılımla olan etkileşimlerini, karşılaştıkları zorlukları ve uygulamanın etkinliğini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Katılımcılar, farklı illerde görev yapan personellerden rastgele seçilmiş olup, farklı cinsiyet, yaş grubu ve deneyim seviyelerine sahip

bireyleri içermektedir. Böylece, 112 acil çağrı uygulamasının çeşitli kullanıcı grupları üzerindeki etkileri geniş bir perspektiften değerlendirilmiş olmaktadır. Anket, tüm katılımcılara çevrim içi ortamda sunulmuş ve belirli bir süre içinde yanıt verilmesi istenmiştir.

Bu çalışmada, kullanıcıların verdiği toplam puan üzerinden yapılan değerlendirme, puanlar ne kadar yüksekse memnuniyetin de o kadar fazla olduğunu göstermektedir. Anket sonuçları ayrıca, katılımcıların çağrı sistemlerini kullanma süreleri, çalıştıkları iller, cinsiyetleri ve kurumlarına göre de analiz edilmiştir. Bu demografik faktörlerin memnuniyetle olan ilişkisi ise ANOVA analizi ile incelenmiştir.

Tablo 2. Kullanıcı memnuniyet anket soruları

No	Soru Metni
1	Yazılımın görsel tasarım ve kullanıcı arayüzü çalışma şartları için iyi seviyededir.
2	Yazılımın arayüzünün özelleştirilebilirliği yeterince esnek ve istenilen ekran tasarımını sağlayabilmektedir.
3	Yazılım kullanımım sırasında tüm beklentilerimi karşılamaktadır.
4	Yazılımın kullanımı sırasında herhangi bir hata ya da çökme sorunu yaşamıyorum.
5	Yazılımın kullanımı sırasında kesintiler veya bağlantı sorunları yaşamıyorum.
6	Yazılımın hızı ve performansı konusunda sorun yaşamamaktayım.
7	Yazılımın güvenliği hakkında herhangi bir endişem bulunmamaktadır.
8	Yazılımın geri bildirimlerini gönderme veya hata bildirme süreçleri iyi seviyededir
9	Yazılım ihtiyaçlarımız doğrultusunda düzenli olarak güncellenerek daha iyi hale gelmektedir.
10	Yazılımın raporlama ve istatistikleri yeterince açıklayıcı ve detaylı şekilde sunulmaktadır.

Toplam anket puanını hesaplarken 2 farklı yol izledik. Ortalama Toplam Puan (OTP) ve 100 üzerinden normalize edilmiş (OTP 100) ifadelerini kullandık.

OTP, bir grup için verilen toplam puanların ortalaması anlamına gelir. Formülü şu şekildedir:

$$OTP = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$\sum_{i=1}^n x_i$ ifadesi tüm kişilerin toplam puanlarının toplamı, n kişi sayısı, x_i i . Kişinin toplam puanı olarak anlamlandırılmıştır.

Örnek; bir ilde 5 kişi varsa ve bunların puanları 40,45,30,25,50 ise; $OTP = \frac{40+45+30+25+50}{5} = \frac{200}{5} = 40$ olur.

OTP 100 tanımı OTP'nin 100 üzerinden normalize edilmiş halidir.

$$OTP\ 100 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{Q \times S} \times 100 \quad (2)$$

Değişkinlerin anlamı: $\sum_{i=1}^n x_i$ tüm kişilerin toplam puanlarının toplamı, n kişi sayısı, Q toplam soru sayısı, S her sorunun maksimum puanıdır.

Örnek; Düzenlenen bir ankette 10 soru sorulmuştur ve soruların cevaplar 1-5 arasında puanlandırılmıştır. Bu ankete 7 kişi katılmış ve bunların puanları 25, 28, 30, 35, 45, 50, 10 ise $OTP\ 100 = \frac{25+28+30+35+45+50+10}{10 \times 5} \times 100 = \frac{223}{50} \times 100 = 0,637 \times 100 = 63,7 = 64$ olur.

Standart sapma, bir setin ne kadar yayıldığını ölçen bir değerdir. Yani, verilen yanıtların ortalama değerden ne kadar uzaklaştığını gösterir. Yüksek bir standart sapma, yanıtların daha fazla çeşitlilik gösterdiğini, düşük bir standart sapma ise yanıtların birbirine yakın olduğunu gösterir.

$$SS = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Ortalama)^2}{N}} \quad (3)$$

Tablo 3. Kullanıcı memnuniyet anketi – OTP, OTP 100 ve Standart Sapma puanları

No	OTP	OTP 100	SS
1	3,32	66	1,01
2	3,25	65	1,02
3	2,93	59	1,06
4	2,61	52	1,12
5	2,65	53	1,11
6	3,24	65	1,13
7	3,75	75	0,97
8	3,33	67	1,05
9	3,48	70	0,99
10	3,47	70	1,01

Tablo 3'teki standart sapma değerleri, kullanıcı deneyimindeki tutarlılığı ve farklılıkları ortaya koymaktadır. Güvenlik konusunda düşük standart sapma değeri, kullanıcıların yazılımın güvenliğine dair ortak bir algıya sahip olduğunu gösterirken, performans, bağlantı stabilitesi ve hata/çökme

sorunlarında yüksek standart sapma değerleri, kullanıcı deneyimlerinde önemli farklılıklar olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, yazılımın bazı kullanıcılar için sorunsuz çalışırken, bazıları için performans ve bağlantı sorunları yaşattığını göstermektedir. Bu nedenle, sistem performansının iyileştirilmesi, hata yönetimi ve yük testlerinin artırılması, kullanıcı deneyimindeki tutarsızlıkları gidermek adına kritik bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada 10 sorudan oluşan bir memnuniyet anketi 3056 kişiye uygulanmış ve anketin istatistiksel değerlendirmesi amacıyla IBM SPSS 26 programı kullanılmıştır. IBM SPSS 26, memnuniyet anketleri için güçlü bir araçtır ve anket verilerinden en iyi şekilde yararlanmanıza yardımcı olur. Anketlerinizi tasarlamaya, analiz etmeye ve raporlamaya olanak tanıyarak, işinizi geliştirmek için değerli bilgiler elde etmenizi sağlar.

Bu çalışmada memnuniyet anketinde değerlendirme ankete verilen toplam puanın değeri ne kadar yüksek ise memnuniyet o kadar fazladır. Ayrıca çalışmaya katılan kişilerin çağrı sistemlerini kullanma yılları, çalışılan iller, cinsiyet ve kuruma göre memnuniyet anketinin toplam puanları arasındaki değişim olup olmadığı ANOVA analizi ile incelenmiştir. ANOVA analizi, istatistikte varyans analizi olarak da bilinen ve grup ortalamaları arasındaki farkların anlamlılığını test etmek için kullanılan bir yöntemdir.

ANOVA analizi, toplam karelerin farkı, serbestlik dereceleri (df), ortalama karelerin hesaplanması, F-Değeri hesaplama, P-Değeri ve sonuç adımlarından oluşmaktadır.

Ortalama hesaplama genel ortalama ve grup ortalamaları adımından oluşur.

Genel ortalama, tüm gruptaki verilerin toplam ortalamasıdır.

$$\bar{X}_{Genel} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{N} \quad (4)$$

k grup sayısı, n_i i -inci gruptaki eleman sayısı, X_{ij} i -inci gruptaki j -inci gözlem değeri, N toplam gözlem sayısıdır.

Grup ortalamalarında ($\bar{X}_i$) her grup için ortalama hesaplanır.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}}{n_i} \quad (5)$$

Toplam karelerin hesaplanması işleminde ANOVA gruplar arası (SSB), gruplar içi (SSW) ve toplam varyansı (SST) inceler.

Toplam kareler (SST) tüm verilerin genel ortalamadan sapmalarının karelerinin toplamıdır.

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_{Genel})^2 \quad (6)$$

Gruplar arası kareler (SSB) grupların ortalamalarının genel ortalamadan sapmalarının karelerinin, her gruptaki gözlem sayısı ile çarpımının toplamıdır.

$$SSB = \sum_{i=1}^k n_i (X_i - \bar{X}_{Genel})^2 \quad (7)$$

Gruplar içi kareler (SSW) her bir grubun içindeki değerlerin, grubun kendi ortalamasından sapmalarının karelerinin toplamıdır.

$$SSW = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (8)$$

Serbestlik dereceleri (df) her varyans kaynağı için hesaplanır. Bunlar;

Gruplar arası serbestlik derecesi:

$$df_{Gruplar\ Arası} = k - 1 \quad (9)$$

Gruplar içi serbestlik derecesi:

$$df_{Gruplar\ İçi} = N - k \quad (10)$$

Toplam serbestlik derecesi:

$$df_{Toplam} = N - 1 \quad (11)$$

Ortalama karelerin hesaplanmasında ortalama kareler, toplam karelerin serbestlik derecesine bölünmesiyle elde edilir. Bunlar;

Gruplar arası ortalama kare (MSB):

$$MSB = \frac{SSB}{df_{Gruplar\ Arası}} \quad (12)$$

Gruplar içi ortalama kare (MSW):

$$MSW = \frac{SSW}{df_{Gruplar\ İçi}} \quad (13)$$

F- değeri, gruplar arası varyansın gruplar içi varyansa oranıdır.

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (14)$$

F- değeri kullanılarak p-değeri hesaplanır. P-değeri, F-değerinin hangi olasılıkla oluştuğunu gösterir. Eğer $p < 0,05$ ise gruplar arasında anlamlı bir fark vardır.

şehirlerdeki kullanıcılar genel olarak daha memnun kalmışlardır. Bu durum, yazılımın farklı bölgelerdeki ihtiyaçlara daha fazla odaklanması gerektiğini göstermektedir.

Cinsiyet faktörü de memnuniyet üzerinde önemli bir etkidir. Anket sonuçlarına göre erkek kullanıcılar, kadın kullanıcılara göre genel olarak daha yüksek memnuniyet puanları vermiştir. Bu fark, yazılımın kullanıcı deneyimi tasarımı dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktör olarak öne çıkmaktadır. Kadın kullanıcılar, bazı özelliklerde daha fazla zorluk yaşadıklarını belirtmişlerdir, bu da yazılımın kullanıcı arayüzünde iyileştirmeler yapılması gerektiğini düşündürmektedir.

Son olarak, yazılımın genel işlevselliği ve performansı, kullanıcı memnuniyetinin en büyük belirleyicilerinden biri olmuştur. Kullanıcılar, yazılımın hızlı yanıt verme süresi, doğru veri doğrulama süreçleri ve kesintisiz çalışma gibi özelliklerini değerlendirmiştir. Bu faktörler doğrudan kullanıcı memnuniyeti ile ilişkilidir ve yazılımın daha hızlı ve hatasız çalışması gerektiği sonucunu ortaya koymuştur. Ayrıca, acil durumlarda sistemin hızının, kullanıcıların güvenliğini ve memnuniyetini artırmak için kritik bir öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

Genel olarak, kullanıcı memnuniyetini etkileyen faktörler arasında kullanıcı deneyimi, yazılımın hız ve doğruluğu, çalışan demografik özellikler ve yazılımın sağladığı genel işlevsellik öne çıkmıştır. Bu veriler doğrultusunda, yazılımın geliştirilmesi için önemli iyileştirme alanları belirlenmiş ve bu alanlarda yapılacak düzenlemelerle kullanıcı memnuniyetinin artırılacağına sonucuna varılmıştır.

4.3. Çalışma Yılı, Yaş, Cinsiyet ve Kurum Gibi Faktörlerin Etkileri

Bu çalışmada çalışma yılına göre ölçek puanlarının değerlendirilmesi Tablo 4'de sunulmuştur. Tabloda çalışma yılı, ankete katılan kişi sayısı ve tüm sorulara verilen toplam anket puanı ortalama toplam puan (OTP) ve ortalama toplam puanın 100 üzerinden normalize edilmiş hali (OTP 100) olarak yer verilmiştir.

Tablo 4. Çalışma yılına göre OTP ve OTP 100

Çalışma Yılı	Kişi Sayısı	OTP	OTP 100
1 yıldan az	73	33	67
1-3 yıl arası	452	30	61
3-5 yıl arası	938	29	59
5 yıldan fazla	1.593	29	57

Tablo 4 incelendiğinde, en fazla kişi sayısı 5 yıldan fazla çalışanlar grubunda (1593 kişi) bulunurken, en az kişi sayısı ise 1 yıldan az çalışanlar grubunda (73 kişi) bulunmaktadır. Tablo 4 incelendiğinde en yüksek OTP puanı 1 yıldan az çalışanlarda görülürken en az OTP puanı ise 3 ve daha fazla çalışanlarda bulunmuştur. Çalışma yılı ile OTP arasında anlamlı fark olup olmadığı ANOVA ile incelendiğinde ise Tablo 5'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5. Çalışma yılına göre ANOVA analizi.

Kaynak	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Kareleri	F	Sig. (P)
Gruplar Arası	2.501,28	3	833,76	8,43	1,41e-5
Grup içi	301.809,88	3.052	98,89		
Toplam	304.311,16	3.055			

Tablo 5 incelendiğinde çalışma yılı ile memnuniyet arasında anlamlı bir fark bulunmuştur. Çalışma yılına göre değerlendirme yapıldıktan sonra illere ve bölgelere dağılımı Şekil 24'de sunulmuştur.



Şekil 23. İllere göre OTP 100

Plaka No	Özellikler	İl	Plaka No	Özellikler	İl	Plaka No	Özellikler	İl	Plaka No	Özellikler	İl	Plaka No	Özellikler	İl	Plaka No	Özellikler	İl
1	31	2.283.298	Akdeniz	31	32	1.818.333	Güneydoğu Anadolu	41	Yük	2.111.907	Marmara	61	31	824.352	Karadeniz		
2	34	464.978	Güneydoğu Anadolu	22	17	414.714	Marmara	42	32	2.529.241	İz Anadol	62	34	85.566	Doğu Anadolu		
3	32	751.344	Ege	23	24	684.411	Doğu Anadolu	43	29	589.701	Ege	63	28	2.228.964	Güneydoğu Anadolu		
4	35	1.016.626	Doğu Anadolu	24	32	245.721	Doğu Anadolu	44	31	742.735	Doğu Anadolu	64	33	179.434	Güneydoğu Anadolu		
5	29	538.267	Karadeniz	32	36	746.993	Doğu Anadolu	45	23	1.475.716	Ege	65	30	1.127.612	Doğu Anadolu		
6	27	5.634.482	İz Anadol	26	Yük	915.418	İz Anadol	46	26	1.116.618	Akdeniz	66	24	418.442	İz Anadol		
7	27	2.698.249	Akdeniz	27	Yük	2.172.134	Güneydoğu Anadolu	47	32	888.874	Güneydoğu Anadolu	67	32	588.510	Karadeniz		
8	31	169.493	Karadeniz	28	34	458.962	Karadeniz	48	27	1.066.736	Ege	68	31	473.051	İz Anadol		
9	29	1.161.782	Ege	29	33	145.544	Karadeniz	49	33	399.202	Doğu Anadolu	69	32	268.838	İz Anadol		
10	25	1.273.519	Marmara	30	34	275.333	Doğu Anadolu	50	31	310.011	İz Anadol	70	37	85.012	Karadeniz		
11	36	228.872	Marmara	31	31	1.544.640	Akdeniz	51	21	365.419	İz Anadol	71	30	277.046	İz Anadol		
12	28	282.556	Doğu Anadolu	32	28	445.325	Akdeniz	52	33	775.800	Karadeniz	72	Yük	647.205	Güneydoğu Anadolu		
13	32	253.988	Doğu Anadolu	33	28	1.938.389	Akdeniz	53	32	344.016	Karadeniz	73	31	557.605	Güneydoğu Anadolu		
14	31	220.924	Karadeniz	34	26	15.891.924	Marmara	54	28	1.098.115	Marmara	74	32	93.481	Doğu Anadolu		
15	34	273.799	Akdeniz	35	35	4.480.528	Ege	55	32	1.377.546	Karadeniz	75	42	283.331	Karadeniz		
16	32	3.229.371	Marmara	36	32	274.829	Doğu Anadolu	56	34	331.311	Güneydoğu Anadolu	76	37	211.594	Doğu Anadolu		
17	29	459.383	Marmara	37	29	378.115	Karadeniz	57	33	228.799	Karadeniz	77	28	286.333	Marmara		
18	Yük	195.766	İz Anadol	38	25	1.443.681	İz Anadol	58	20	459.401	İz Anadol	78	32	252.058	Karadeniz		
19	36	154.138	Karadeniz	39	31	369.347	Marmara	59	32	1.147.050	Marmara	79	29	149.978	Güneydoğu Anadolu		
20	24	1.019.087	Ege	40	33	258.519	İz Anadol	60	31	1.086.014	Karadeniz	80	32	559.495	Akdeniz		
												81	33	405.131	Karadeniz		

Şekil 24. İllere göre OTP

Şekil 24 incelendiğinde, yeni 112 uygulamasından en çok memnun olan yer 75 plaka kodu ile Ardahan olurken en az memnuniyet ise 22 plaka ise Denizli olmuştur. Nüfusun yoğun olduğu yerlerde genellikle memnuniyet diğer nüfusu az olan illere nispetle daha az olmuştur. İller ile memnuniyet arasında ANOVA

analizi yapıldığında ise Tablo 6'deki gibi bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 6. Çalışılan illere göre OTP ve OTP 100.

Kaynak	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Karesi	F	Sig. (P)
Gruplar Arası	46.735,51	74	931,56	7,31	5,01e-65
Gruplar İçi	257.575,65	2.981	86,41		
Toplam	304.311,16	3.055			

Tablo 6 incelendiğinde F istatistik değeri: 7,31 ve bu değer gruplar arası ortalama karelerinin gruplar içi ortalama karelerine oranını göstermektedir. p değeri (Sig.): $5,01 \times 10^{-65}$ değeridir. Bu, elde edilen sonuçların %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (çünkü $5,01 \times 10^{-65} < 0,05$). Bu nedenle, null hipotezi reddedilir. Sonuç olarak, illere göre toplam ölçek puanları ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu görülmektedir.

Cinsiyet ile memnuniyet ortalama toplam puanlarını incelediğimizde karşımıza Tablo 7'deki gibi bir sonuç çıkmaktadır.

Tablo 7. Cinsiyete göre OTP ve OTP 100.

Cinsiyet	Kişi Sayısı	OTP	OTP 100
Kadın	1.712	28	57
Erkek	1.344	31	61

Tablo 7 incelendiğinde, erkeklerin ortalama toplam ölçek puanı 31 iken, kadınların ortalama puanı 28'dir. Bu da erkeklerin ortalama olarak kadınlardan biraz daha yüksek puan aldığını göstermektedir. ANOVA ile cinsiyet ve memnuniyet ilişkisi incelendiğinde ise Tablo 8'deki gibi bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 8. Cinsiyete göre ANOVA analizi.

Kaynak	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Karesi	F	Sig. (P)
Gruplar Arası	4.357,18	1	4.357,18	44,36	3,22e-11
Gruplar İçi	299.953,98	3.054	98,22		
Toplam	304.311,16	3.055			

Çalışma yılı, iller ve cinsiyete göre değerlendirdikten sonra kişilerin çalıştıkları kuruma göre analiz edildiğinde Tablo 9'deki gibi bir sonuç elde edilmiştir.

Tablo 9. Kurumlara göre Memnuniyet OTP ve OTP 100.

Kurum Adı	Kişi Sayısı	OTP	OTP 100
AFAD	25	32	64
Çağrı Karşılama	1.377	28	55
Emniyet	393	31	62
İtfaiye	237	31	63
Jandarma	235	37	75
Orman	97	36	72
Sağlık	666	27	53
Sahil Güvenlik	26	36	72

Tablo 9'e göre jandarma kurumu en yüksek ortalama puana sahipken (37), sağlık en düşük ortalama puana sahiptir (27). Çoğu kurum 28-32 civarında puan alırken, sahil güvenlik ve orman biraz daha yüksek ortalamalara sahiptir. Kurumlarla memnuniyet anketi arasındaki ilişki incelendiğinde Tablo 10'daki sonuç elde edilmiştir.

Tablo 10. Kurumlara göre ANOVA analizi.

Kaynak	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Karesi	F	Sig. (P)
Gruplar Arası	31.663,36	7	4.523,34	50,18	1,85e-68
Gruplar İçi	272.647,80	3.048	89,45		
Toplam	304.311,16	3.055			

Tablo 10 incelendiğinde F değeri 50,57 ve anlamlılık düzeyi $1,85 \times 10^{-68}$ olduğundan null hipotez reddedilir. Bu da kurumlar arası ortalama toplam ölçek puanlarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğunu göstermektedir.

Katılımcıların yaş dağılımı incelendiğinde de büyük bir kısmı 25-45 yaş aralığındadır. Bu yaş grubu, yazılımın ana kullanıcı kitlesini oluşturmaktadır. Tablo 11'de yaş aralığı ve katılımcı sayısı verilmiştir.

Tablo 11. Yaş dağılımına göre OTP ve OTP 100.

Yaş Aralığı	Kişi Sayısı	OTP	OTP 100
18-25	304	30	59
26-35	1.550	29	58
36-45	863	29	58
46-60	320	33	65
60'dan büyük	19	31	63

Tablo 11'e göre en çok personel 26-35 yaş aralığında bulunurken 26-45 yaş aralığında 29 puanla en düşük puana sahiptir. En yüksek puan 46-60 yaş aralığındayken en az personel 19 kişiyle 60'dan büyük aralığındadır.

Tablo 12. Yaş dağılımına göre ANOVA analizi.

Kaynak	Karelerin Toplamı	Serbestlik Derecesi (df)	Ortalama Karesi	F	Sig.
Gruplar Arası	22,94	2.991	4,59	8,500,0	
Gruplar İçi	1.645,81	2.991	0,54		
Toplam	1.668,75	3.056			

Tablo 12 incelendiğinde gruplar arası, yaş grupları arasındaki varyans, karelerin toplamı 22,94 ve F istatistiği 8,5 hesaplanmıştır. Gruplar içi, her yaş grubu içindeki varyans karelerin toplamı 1645,81 ve ortalama karesi 0,54 hesaplanmıştır. F istatistiği 8,5 olarak hesaplanmıştır ve bu değer P değeri 0,0 ile anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlarla yaş aralığına göre gruplar arasında farkın anlamlı olduğunu görebiliriz.

4.4. Test Süreçlerinin Kısıtlılıkları ve İyileştirme Önerileri

Yapılan test süreçleri, 112 acil çağrı uygulamasının çeşitli işlevlerini ve kullanıcı etkileşimini değerlendirmek açısından önemli bilgiler sağlamış olsa da bazı kısıtlılıklar mevcuttur. Bu kısıtlılıklar, testlerin gerçek dünya senaryolarını yeterince yansıtamaması ve bazı kritik test aşamalarının eksik kalması gibi unsurları içermektedir. Bu nedenle, test süreçlerinin daha etkin hale getirilmesi için belirli iyileştirmeler önerilmektedir.

Birincil kısıtlama, test senaryolarının gerçek acil durum koşullarını tam anlamıyla yansıtamamasıdır. Çoğu test, sistemin temel işlevselliğini kontrol etmeye odaklanırken, acil durumların karmaşık doğasını ve

kullanıcıların yüksek stres altındaki performansını simüle edememiştir. Bu nedenle, test senaryolarının daha gerçekçi hale getirilmesi, yazılımın acil durum senaryolarındaki etkinliğini daha doğru şekilde ölçebilmek için önemlidir. Gelecekteki testlerde, daha karmaşık senaryolar ve çoklu acil durum senaryoları kullanılarak yazılımın dayanıklılığı daha iyi test edilebilir. Ayrıca, yazılımın stresli durumlarla nasıl başa çıktığını test etmek için yük testlerinin ve stres testlerinin daha fazla vurgulanması gerekir.

Bir diğer kısıtlama, kullanıcı çeşitliliği ve farklı demografik özelliklere sahip kullanıcılar üzerindeki etkilerin yeterince dikkate alınmamasıdır. Testlerde genellikle belli bir grup kullanıcıya odaklanılmışken, farklı yaş grupları, cinsiyetler ve deneyim seviyelerindeki kullanıcıların yazılımı nasıl kullandığı yeterince araştırılmamıştır. Test süreçlerine daha geniş bir kullanıcı kitlesi dahil edilerek, yazılımın farklı demografik özelliklere sahip bireyler üzerindeki etkisi daha kapsamlı bir şekilde analiz edilmelidir. Bu tür kullanıcı profillerinin teste dahil edilmesi, yazılımın genel erişilebilirliğini artıracaktır.

Ayrıca, otomatik testlerin ve manuel testlerin dengeli bir şekilde entegrasyonu eksik kalmıştır. Manuel testler, testlerin doğruluğunu kontrol etme açısından faydalı olsa da otomatik testler, yazılımın belirli işlevlerini daha hızlı ve tekrar edilebilir şekilde test etme imkânı sağlar. Öneri: Otomatik test araçlarının kullanımının artırılması, yazılımın daha hızlı ve sürekli olarak test edilmesini sağlayacaktır. Otomatik testler, özellikle yazılımın performansını ve güvenliğini kontrol etmek için etkili olabilir.

Eğitim ve test senaryoları doğrulama da önemli bir eksiklik olarak öne çıkmaktadır. Test sürecine katılan bazı kullanıcılar, yazılımın tüm işlevleri ve test senaryoları hakkında yeterince bilgi sahibi olmamış olabilir. Bu durum, testlerin doğruluğunu ve geçerliliğini etkileyebilir. Öneri: Test katılımcılarının eğitimlerinin daha kapsamlı olması, ayrıca test senaryolarının daha detaylı şekilde doğrulanması, yazılımın işlevsellik testlerinin daha güvenilir olmasını sağlar.

Son olarak, test sonrası geri bildirim ve analiz süreçleri yeterince derinlemesine yapılmamıştır. Testlerden elde edilen verilerin analiz edilmesi ve yazılımın zayıf yönlerinin belirlenmesi aşamasında eksiklikler bulunmaktadır. Öneri: Test sonrası geri bildirimlerin toplanması ve düzenli bir analiz sürecinin oluşturulması, yazılım geliştirme sürecinde iyileştirme alanlarının daha hızlı bir şekilde belirlenmesini sağlayacaktır.

Bu iyileştirmeler, test süreçlerinin daha kapsamlı, etkin ve gerçekçi olmasını sağlayarak yazılımın kalitesini artıracaktır. Ayrıca, yazılımın kullanıcı dostu ve güvenilir olma hedeflerine daha etkili bir şekilde ulaşılmasını sağlayacaktır.

V. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada elde edilen bulgular, 112 acil çağrı uygulamasının kullanıcı memnuniyeti ve yazılım testleri üzerine yapılan testlerin etkinliğini ortaya koymaktadır. Yazılımın performansı, kullanıcı etkileşimi ve işlevselliği değerlendirilmiş olup, bu değerlendirmeler mevcut literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında bazı önemli benzerlikler ve farklılıklar gözlemlenmiştir.

Öncelikle, kullanıcı memnuniyeti ile ilgili elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalarda belirtilen bulgularla uyum göstermektedir. Örneğin, acil çağrı uygulamalarının kullanıcı memnuniyetini artırmak için yazılımın basit, hızlı ve güvenilir olması gerektiğini vurgulamaktadır [19, 20]. Benzer şekilde, bu çalışmada da kullanıcıların uygulama üzerinden aldıkları hizmetin hızını ve güvenilirliğini olumlu bir şekilde değerlendirdikleri görülmüştür. Kullanıcıların hızlı ve doğru bilgi edinme, çağrıları etkili bir şekilde yönlendirme ve acil durumlarla etkin şekilde başa çıkabilme kabiliyetine sahip olmaları, kullanıcı memnuniyetini artıran temel unsurlar olarak öne çıkmıştır.

Ancak, mevcut literatürle karşılaştırıldığında, bu çalışmada bazı test süreçlerinin daha derinlemesine ele alınması gerektiği sonucuna varılmıştır. Örneğin, acil çağrı yazılımlarının performans testlerinin daha kapsamlı bir şekilde yapılması gerektiğini belirtirken, bu çalışmada, stres testlerinin daha fazla yer alması gerektiği öne çıkmıştır [21]. Bu tür testler, yazılımın kriz anlarında nasıl tepki verdiğini gözler önüne serebilir ve sistemin ne kadar güvenilir olduğunu daha doğru bir şekilde değerlendirebilir. Literatürde sıkça karşılaşılan başka bir bulgu, kullanıcı etkileşimlerinin genellikle yaş ve deneyime göre değişkenlik gösterdiği ve yazılımın her kullanıcı kitlesi için özelleştirilmesi gerektiğidir [23]. Bu çalışmada da benzer şekilde, kullanıcıların yaş, deneyim ve cinsiyet gibi demografik özelliklerine bağlı olarak yazılımdan aldıkları verim ve memnuniyetin farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

Bunun yanı sıra, yazılım test senaryolarının doğruluğunu artırmak için sürekli güncellenmesi gerektiğini vurgulamaktadır [22]. Bu çalışma da benzer şekilde, test senaryolarının, özellikle farklı acil durum senaryolarına ve güncel teknolojik gelişmelere göre dinamik olarak güncellenmesinin gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu, yazılımın güvenliğini ve etkinliğini artıracak ve gerçek acil durumlarda daha etkin bir şekilde çalışmasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, elde edilen bulgular, mevcut literatürdeki genel eğilimlerle uyumlu olmakla birlikte, test süreçleri ve kullanıcı memnuniyeti analizlerinde yapılacak bazı iyileştirmeler ile yazılımın daha da etkin hale getirilebileceğini göstermektedir. Bu çalışma, özellikle kullanıcı etkileşimlerinin daha kapsamlı analiz edilmesi gerektiğine dair literatüre katkı sağlamakta olup, gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir referans oluşturacağı düşünülmektedir.

Araştırma, 112 Acil Çağrı Uygulamasının etkinliğini ve kullanıcı memnuniyetini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Yapılan test senaryoları ve memnuniyet anketleri, uygulamanın güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymuş ve yazılımın geliştirilmesi için önemli ipuçları sağlamıştır. Test süreçleri, yazılımın fonksiyonel işlevselliğini doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda kullanıcı deneyimini ve performansını da kapsamlı bir şekilde değerlendirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, yazılımın temel işlevsellik açısından iyi performans sergilediği, ancak bazı alanlarda, özellikle kullanıcı arayüzü ve sistem entegrasyonları gibi konularda iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir.

Yapılan analizlerde, test senaryolarının çoğunlukla başarılı olduğu, ancak daha karmaşık acil durum senaryoları ve çoklu kullanıcı etkileşimleri gibi daha geniş kapsamlı testlerin eklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kullanıcı memnuniyeti anketleri, yazılımın kullanıcı dostu ve etkin olduğuna dair genel bir görüş ortaya koymuş olsa da bazı kullanıcı gruplarının, özellikle acil çağrı merkezi çalışanlarının, yazılımın kullanımında belirli zorluklarla karşılaştığı tespit edilmiştir.

Genel olarak, bu araştırma, acil çağrı uygulamaları konusunda yapılacak daha fazla çalışmanın gerekliliğini ve bu tür sistemlerin kullanıcı memnuniyeti ile güvenliğini artırma potansiyelini ortaya koymuştur. Sonuçlar, 112 Acil Çağrı Uygulamasının, güncel test süreçleri ve kullanıcı deneyimi analizi ışığında daha verimli ve etkin bir şekilde geliştirilmesine yönelik yönlendirmeler sunmaktadır.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar, 112 Acil Çağrı Uygulaması ve benzeri acil durum yazılımlarının daha etkin ve güvenli hale getirilmesi için kritik öneme sahiptir. İlk olarak, yazılımın performansını ve dayanıklılığını test etmek amacıyla daha geniş ve farklı senaryoları kapsayan test süreçlerinin uygulanması önerilmektedir. Özellikle, yazılımın yüksek kullanıcı yoğunluğu altında nasıl performans gösterdiği, acil durumlar sırasında çoklu kullanıcı etkileşimlerinin yazılım üzerindeki etkileri gibi alanlar daha derinlemesine incelenmelidir. Bu tür testler, yazılımın olası aksaklıklarını önceden tespit etmek ve müdahale süreçlerini iyileştirmek adına önemlidir.

Bir diğer önemli nokta, yazılımın kullanıcı deneyimini geliştirmeye yönelik yapılacak çalışmaların artırılmasıdır. Kullanıcı arayüzü ve etkileşimli süreçlerin daha sezgisel ve anlaşılır hale getirilmesi, acil durumlarda daha hızlı ve doğru müdahaleyi mümkün kılacaktır. Gelecekteki çalışmalarda, özellikle acil çağrı merkezi çalışanlarının yazılımla olan etkileşimleri üzerinden yapılacak gözlemler, yazılımın kullanıcı dostu olup olmadığını değerlendirmek için kritik veri sağlayacaktır.

Ayrıca, sistem entegrasyonları ve farklı kurumlarla olan uyum konusunda yapılacak araştırmalar da önemlidir. 112 Acil Çağrı Uygulaması, sağlık, güvenlik ve itfaiye gibi farklı kurumlarla entegre çalıştığı için bu entegrasyon süreçlerinin kesintisiz ve doğru bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalar, yazılımın bu kurumlarla daha etkili iletişim kurmasını sağlayacak altyapıların geliştirilmesi yönünde odaklanmalıdır.

Son olarak, kullanıcı memnuniyeti ve geri bildirimlerin yazılım geliştirme süreçlerine daha fazla dahil edilmesi gerektiği bir diğer önemli bulgudur. Gelecekte yapılacak anketler, gözlemler ve kullanıcı geribildirimlerini toplayarak, yazılımın performansı ve kullanıcı deneyimi hakkında daha fazla veri toplanabilir. Bu sayede, yazılımın kullanıcı ihtiyaçlarına göre daha fazla özelleştirilmesi ve sürekli olarak iyileştirilmesi sağlanabilir.

Bu öneriler ışığında, 112 Acil Çağrı Uygulamasının daha güvenli, verimli ve kullanıcı dostu hale getirilmesi adına çalışmaların genişletilmesi, yenilikçi teknolojilerin entegrasyonu ve kapsamlı testlerin yapılması gerektiği açıkça görülmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalar, acil durum çağrı sistemlerinin etkinliğini ve güvenliğini artırmak adına önemli adımlar atılmasına olanak sağlayacaktır.

YAZAR KATKI BEYANI

Gerçekleştirilen çalışmada Yusuf SELİMDAROĞLU fikrin oluşması, tasarımın yapılması, literatür taraması, çalışma kapsamında geliştirilen ölçeğin uygulanması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Özgür TONKAL sonuçların incelenmesi, içerik açısından makalenin kontrol edilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

ETİK KURUL ONAYI VE ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Bu çalışma kapsamında, Samsun Üniversitesi Etik Kurulu (Etik kurul onay numarası: 2024-76) tarafından onay alınmıştır. Ayrıca, anketin gerçekleştirildiği İller İdaresi Genel Müdürlüğünden yazılı izin alınmış ve anket çalışması, kurum personellerine etik kurallar çerçevesinde uygulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Aydemir, E., Demirel, N.Ç., Kıvrak, T., & Yüksel, M. (2014). Development of an Artificial Neural Networks Prediction Model for Determining Call Numbers to 112 Emergency Call Center. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 20(5), 145-149.
- [2] Alpakan, A.H. (2019). Evaluation of Factors Affecting Attention Level of 112 Emergency Call Center Employees. Institute of Health Sciences.
- [3] Kaya, Z., & Öcal, H. (2023). The Effect of Transformational Leadership on Organizational Trust in Virtual Organizations - A Research in 112 Emergency Call Centers. Prehospital Journal, 8(1), 13-29.
- [4] Tarcan, M., Hikmet, N., Schooley, B., Top, M., & Tarcan, G.Y. (2017). An Analysis of the Relationship Between Burnout, Socio-demographic and Workplace Factors and Job Satisfaction Among Emergency Department Health Professionals. Applied Nursing Research, 34, 40-47.
- [5] Yuldoşev, D. (2015). The Effect of Technology Literacy on Electronic Product Purchasing Behavior (Kyrgyzstan Example). Sakarya University.
- [6] Uysal, İ., Kıyak, M., Eryılmaz, M., & Bektaş, G. (2022). Development and Application Example of Evaluation Scale in Terms of Satisfaction, Efficiency, Safety and Performance of 112 Emergency Aid Stations. Prehospital Journal, 7(2), 159-174.
- [7] Subudhi, B.S.K., Trecarichi, G., Dragoni, M., & Baillie, J.K. (2020). Performance Testing for VoIP Emergency Services: A Case Study of the EMYNOS Platform and a Reflection on Potential Blockchain Utilisation for NG112 Emergency Communication. Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks, 12(1), 1-8.
- [8] Siddiky, M.N.A., Rahman, M.E., & Uzzal, M.S. (2024). Beyond 5G: A Comprehensive Exploration of 6G Wireless Communication Technologies.
- [9] Yoou, S.K., & Kwon, H.J. (2015). Study About the Satisfaction with Simulation Practice Course Experience on ACLS of Paramedic Students. Journal of The Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 16(10), 6647-6654.
- [10] Serdaroglu, D. (2015). Software Testing Process and PRISMA Approach Application in TMMi Model. Institute of Science and Technology.
- [11] Garousi, V., Shepherd, D.C., & Herikilolu, K. (2020). Software-testing Education: A Systematic Literature Mapping. Journal of Systems and Software, 165, 110570.
- [12] Özdemir, E. (2020). Agile Approaches in Project Management in Large-scale Companies. Işık University.

-
- [13] Alshamrani, A., & Bahattab, A. (2015). A Comparison Between Three SDLC Models Waterfall Model, Spiral Model, and Incremental/Iterative Model. *International Journal of Computer Science Issues*, 12(1), 106.
- [14] Nalbant, E. (2020). The Importance of Testing in Software Life Cycle and Implementation of a Test Automation. *Institute of Science and Technology*.
- [15] Başar, A. (2015). Improvement of Test Processes with Maturity Level Model: An Application in a Software Development Company with Scrum. XVII. Academic Informatics Conference (AB 2015).
- [16] Öztürk, İ. (2022). The Importance and Methods of Software Testing Processes in Banking Sector. *Journal of Computer Sciences and Technologies*, 3(1), 23-29.
- [17] Yılmaz, N. (2023). Sustainable Leadership: A Scale Adaptation Study. Marmara University.
- [18] Bektaş, H. (2015). Factor Analysis for Binary Variables: An Application on Quality of Work Life.
- [19] Al-Hajri, F., & Al-Shaibani, A. (2019). Evaluating Emergency Management Systems: Key Performance Indicators and User Satisfaction. *International Journal of Emergency Management*, 18(3), 151-165.
- [20] Jørgensen, H. (2020). User Satisfaction in Emergency Response Systems: A Case Study of 112 Emergency Calls. *Journal of Public Safety Technology*, 34(2), 115-130.
- [21] Kouadio, A., N'Guessan, L., & Kone, Y. (2021). Performance Evaluation of Emergency Call Systems Under Stress Testing Conditions. *Safety Science*, 138, 105188.
- [22] Sharma, S., & Gupta, R. (2021). The Importance of Continuous Software Testing for Emergency Call Systems: A Review of Existing Practices. *Journal of Software Engineering and Applications*, 14(4), 244-259.
- [23] Todorov, E., Menzel, J., & Smith, T. (2020). User Interface Design for Emergency Response Systems: The Role of Demographics in User Satisfaction. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(7), 626-637.

Correlation between Spheroid Formation Ability and Reported Invasiveness of HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa Cancer Cell Lines in Commercial Well Plates

İsmail EŞ ¹ 

¹Department of Biochemical Engineering, University College London, London, UK

Abstract

Three-dimensional (3D) cell cultures, such as spheroids, are essential for replicating *in vivo* tumor environments, offering a more accurate model for cancer research and drug testing. Spheroids form through the self-aggregation of cells under specific conditions, enabling the study of cellular behavior, including invasiveness. In this study, we investigated the correlation between spheroid formation ability and the reported invasiveness of four widely used human cancer cell lines — Human Embryonic Kidney 293 (HEK-293), Human Colorectal Adenocarcinoma (HT-29), Human Breast Cancer (MDA-MB-231), and Human Cervical Cancer (HeLa) — using a commercial round bottom 96-well microplate and AggreWell™ microwells with varying cell seeding concentrations. Cells were cultured in highly viscous media and seeded at varying densities (1,000, 2,000, and 3,000 cells per well) to assess the effect of cell number on spheroid size over time. Microscopic analysis revealed distinct differences among the cell lines; HEK-293 and HT-29 cells formed compact, well-defined spheroids, with larger spheroids observed at higher seeding densities. In contrast, the more aggressive and invasive MDA-MB-231 and HeLa cells failed to form spheroids under these conditions. These findings demonstrate the intricate relationship between cancer cell aggressiveness, seeding density, and spheroid formation ability, which are critical factors in optimizing 3D culture-based drug development and cancer research

Keywords: 3D cell culture, Spheroid formation, Cancer cell lines, Tumor invasiveness, Seeding density, Drug testing models

I. INTRODUCTION

The development of novel therapeutics and advanced drug delivery systems for genetic disorders, particularly cancer, has become a major area of research focus. Cancer alone accounted for nearly 10 million fatalities globally in 2020 [1]. Despite significant efforts, the rate of successful drug approvals remains relatively low, largely due to the lack of robust biological models that can effectively replicate the complexity of *in vivo* environments [2]. To address this challenge, there is a critical need to enhance preclinical testing platforms. By employing more physiologically relevant and efficient systems, researchers can improve the accuracy of drug evaluations, thereby increasing the likelihood of successful clinical translation and regulatory approval. For many years, drug screening has primarily relied on traditional 2D cell cultures, where cells grow in a single layer on flat surfaces [3]. This method is cost-efficient and well-studied [4]. However, 2D cultures have significant limitations. Cells grown in this environment lack the complex interactions seen in living tissues, as they cannot fully connect or communicate with one another. Additionally, during drug testing, the uniform exposure of cells to drugs does not reflect the natural conditions of tissues. This creates an oversimplified model that fails to capture the intricate dynamics of cell behavior and communication [5]. To address these shortcomings, there is a growing need for more advanced systems that better replicate the conditions of living organisms. As a result, 3D cell cultures have gained prominence as a superior alternative, and offer a more accurate representation of drug absorption and metabolic processes, closely mirroring *in vivo* conditions.

Three-dimensional (3D) cell culture systems play a pivotal role in tissue engineering and have been used as excellent platforms to create tissue-like structures that closely resemble *in vivo* conditions. These systems are broadly categorized into two methodologies: the "top-down" and "bottom-up" approaches [6]. In the top-down approach, cells are seeded onto 3D porous scaffolds that serve as temporary support structures [7]. As cells proliferate, the scaffold gradually degrades, allowing the formation of tissue-like constructs. However, this method often faces limitations, such as uneven cell distribution and challenges in accurately replicating the complexity of natural tissues [8]. To overcome these drawbacks, the bottom-up approach has gained prominence since the early 2000s [7]. This method relies on the creation of spheroids, which act as fundamental building blocks for constructing artificial tissues and organs [9]. Spheroid formation is driven by intricate cell-to-cell communication mechanisms, including the activation of integrins and the expression of cadherins, which are transmembrane proteins essential for cell adhesion [10]. These molecular interactions result in realistic cellular behavior and enable cells to respond more accurately to external stimuli. As a result, spheroids have emerged as highly promising tools in biomedical research, offering enhanced physiological relevance for applications such as drug testing and disease modelling.

Spheroids are widely utilized in various fields of biomedical research, including regenerative medicine for constructing 3D tissue models, drug metabolism studies to understand drug mechanisms and physiological responses, and, most notably, in cancer research as dynamic micro-tumor models to assess the efficacy of novel therapeutic agents [10]. To accurately evaluate the potential of cancer drug formulations, it is crucial to develop spheroid models with optimized properties. Under ideal conditions, cells can autonomously organize into spheroids through a process known as self-assembly, which occurs *in vitro* without external manipulation [11]. To facilitate this, commercially available platforms have been designed to promote self-organization by minimizing cell adhesion to surfaces, thereby encouraging cell-cell interactions [12]. Advances in science and technology have led to the development of diverse spheroid formation platforms, including magnetic levitation [13], hanging-drop methods [14], and suspension cultures [15]. Among these, commercial tools such as round-bottom microplates or AggreWell™800 microwells have gained significant attention due to their ability to enhance spheroid formation. The round-bottom design is particularly advantageous as it promotes the natural aggregation of cells into a single focal point, facilitating the formation of uniform and well-defined spheroids. Additionally, these microplates enable the simultaneous generation of a large number of spheroids in a single experiment, significantly

enriching statistical data and improving the reliability of experimental outcomes.

In this study, the spheroid-forming capabilities of four distinct cell lines—HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa—each exhibiting varying levels of invasiveness, were compared. The findings revealed significant differences in their ability to form spheroids under identical conditions. While HEK-293 and HT-29 cells consistently formed compact, well-defined spheroids, particularly at higher seeding densities, the more invasive MDA-MB-231 and HeLa cells failed to aggregate into spheroids using commercial spheroid-forming platforms. It should be noted that HeLa cells have been shown to form spheroids under different culture conditions and techniques in previous studies [16]. However, spheroid formation capacity may vary depending on factors such as culture medium composition, use of extracellular matrix components, and even the specific HeLa subline used, which can be genetically modified or adapted for 3D culture applications. Our results show the critical role of cellular invasiveness and seeding density in spheroid formation, which potentially suggests that highly aggressive cancer cells may resist self-assembly due to their migratory and invasive nature and may require more specific culture conditions. Unlike previous studies that have focused solely on spheroid formation efficiency, our work highlights the influence of both seeding density and platform type on the behavior of aggressive cancer cell lines in viscous culture media. This comparison reveals overlooked limitations of widely used cell lines in low-cost 3D culture setups. While the spheroid formation ability of cancer cells has been investigated in previous studies, direct comparisons correlating this ability with reported invasive and aggressive characteristics of cancer cell lines remain limited. In this context, we aimed to provide a quick and accessible reference using standardized 3D culture techniques to explore how reported invasiveness might influence spheroid formation behavior. In this context, our study aimed to provide a quick and accessible reference using standardized 3D culture techniques. We believe such a comparative report is valuable for understanding how these biological features can influence spheroid formation, even under optimized and widely used culture conditions. We believe these insights provide valuable understanding into why certain cell types are more challenging to model in 3D cultures.

II. MATERIAL AND METHODS

2.1. Material

The HEK-293 (human embryonic kidney cells), HeLa (human cervical cancer cells), HT-29 (human colon adenocarcinoma cells), and GFP-labeled MDAMB-231 (human breast cancer cells) were generously provided by the Biochemical Engineering Department at University College London (UCL), located in London,

United Kingdom. For cell detachment during subculturing, a trypsin enzyme solution derived from bovine pancreas was utilized, sourced from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). The culture medium used for the experiments was FluoroBrite™ DMEM, a specialized formulation from Gibco designed to minimize background fluorescence by 90% compared to standard phenol red-free media. This medium was supplemented with GlutaMAX™, obtained from Gibco, and fetal bovine serum (FBS), procured from Thermo Fisher Scientific, to support cell growth and viability. Phosphate-buffered saline (PBS), also purchased from Gibco, was used for washing steps during cell culture procedures. To assess cell viability and transfection efficiency, staining solutions such as propidium iodide and Hoechst 33342 were employed, both sourced from Chemometec (Denmark). These dyes were used to distinguish between live and dead cells. Additionally, the NC-Slide A8™, purchased from Chemometec, was utilized for counting the cells and analyzing their viability.

2.2. Animal cell culture

HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa cell lines were cultured in FluoroBrite™ Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) supplemented with 10% fetal bovine serum (FBS) and 4 mM GlutaMAX™ to support optimal cell growth and viability. The cells were routinely passaged every 2 to 3 days to maintain them in an exponential growth phase. For subculturing, the cells were grown in T25 cell culture flasks featuring the Thermo Scientific™ Nunclon™ Delta surface, which is specifically designed to enhance cell adhesion and proliferation. The flasks were incubated in a humidified environment at 37°C with 5% CO₂ to mimic physiological conditions and ensure consistent cell growth. During passaging, cells were detached using a standard trypsin-EDTA solution, counted, and reseeded at appropriate densities to maintain healthy and confluent cultures.

2.3. Spheroid Formation in Commercial Round Bottom Microplate

The aforementioned cell lines were tested for their ability to form spheroids in commercial 96-well clear round bottom TC-treated microplate (Corning, USA). Once 90% of cell confluency was achieved in T25 flask, the cells were dissociated from the surface of culture flask and counted using NucleoCounter® NC-3000™ (Chemometec) using Vial-Cassette™ that contains two immobilized fluorophores, acridine orange (AO) and DAPI. For spheroid formation in round bottom microplate, highly-viscous culture media solution was prepared using 10% METHOCEL® cellulose ethers with 90% of FluoroBrite DMEM containing 10% FBS and Glutamax. After pouring 100 µL of methocel-containing culture media, the cell concentrations of 1000, 2000, and 3000 were seeded into each well of microplate.

2.4. Spheroid Formation in Commercial Round Bottom Microplate

For spheroid formation in AggreWell™800 plate, microwells were first pre-treated with 500 µL of AggreWell™800 Rinsing Solution and centrifuged at 2000 x g for 5 min using a rotor fitted with plate holders. Once the surface treated with rinsing solution, it was removed from microwells and was aspirated and microwells were rinsed with 2 mL of warm basal medium. Afterward, 2 mL of warm FluoroBrite DMEM containing cell suspension (3,000 cells per microwell) was added into wells and the plate was centrifuged at 100 x g for 3 min to capture HeLa cells in the microwells. After two days of incubation, the microplates were analyzed under the fluorescent microscope to evaluate the spheroid formation of each cell.

2.5. Morphological Analysis

The formation of spheroids was monitored and visualized using the EVOS™ Digital Color Fluorescence Microscope (Invitrogen). Images were captured daily under bright field illumination to assess the morphological characteristics of the spheroids. The morphological characteristics of spheroids, including their diameter and circularity, were quantified by processing bright-field images using ImageJ software. For circularity measurements, the corresponding images were first imported into ImageJ. Prior to analysis, each image was converted to a binary format to distinguish the spheroid structures from the background. Circularity analysis was performed using the built-in plugin developed by Wayne Rasband (wsr@nih.gov). The measurement settings were configured by selecting the "Circularity" parameter within the "Set Measurements" option under the "Analyze" menu. Individual spheroids were manually outlined using the "Freehand Selections" tool to ensure accurate boundary detection. Following this, the "Measure" function was applied to calculate the circularity of each spheroid based on the formula: $\text{circularity} = 4\pi(\text{area}/\text{perimeter}^2)$. This procedure was repeated for all spheroids present in the image set. The resulting circularity values were collected and subsequently used for further quantitative analysis and interpretation.

2.6. Morphological Analysis

The differences in spheroid formation among the two cell lines during 4 days, as well as the variations observed between different seeding concentrations (1,000, 2,000, and 3,000 cells per well), were statistically analyzed. Quantitative experiments were conducted at least in triplicates to ensure reproducibility and reliability of the data. Statistical analysis was performed using GraphPad Prism software, and significance was determined using appropriate statistical tests. For this, ordinary one-way ANOVA was employed and $p < 0.05$ was considered

significantly different. Results are presented as mean $\pm$ standard deviation.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Spheroid formation ability in round bottom microplate

In our study, different cancer cell lines (HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa) were tested in Corning® 96-well clear round bottom TC-treated microplate and AggreWell™800 as a commercial kit to evaluate their ability to form spheroids. Among the four cell lines, only HEK-293 is not a cancer-derived line; however, due to its immortalized nature, well-characterized growth properties, and widespread use as a control model in cancer research, we included HEK-293 cells in this study to provide a relevant reference point for comparing spheroid formation with cancerous cell lines[17]. Culture media was prepared using 10% METHOCEL® cellulose ethers for spheroid formation in microplate. According to the images acquired under the microscope, it was confirmed that both HeLa and MDAMB-231 cell lines couldn't form spheroids (Figure 2). In hypothesis, the cancer cells (e.g. HeLa and MDA-MB-231) with significantly more aggressive and invasive characteristics may possess certain difficulties to form spheroids as they want to expand rapidly instead of pattern-driven uniform self-assembly. On the other hand, HT-29 and HEK-293 cell lines are considerably less aggressive and formed spheroids with exceptional circularity and rigidity (Figure 2). Another crucial parameter that may perturb the formation of spheroid is the effect of culture medium. METHOCEL® is a water-soluble methylcellulose and hydroxypropyl methylcellulose polymers and was used to increase the viscosity of tissue-culture fluids for spheroid formation. The advantage of this gel is that the spheroids can be easily separated by cooling the culture medium in a refrigerator for a short period of time, during which the gel liquefies, enabling it to be facilely removed by pipetting. Due to its highly viscous characteristics, it may restrict the movement of aggressive cell lines and consequently induce slight changes in their metabolic pathways that impede them to form spheroids.

As shown in Figure 1, spheroid size increased over time in all seeding density groups, indicating continuous cell proliferation and compact spheroid formation. Higher initial cell numbers resulted in larger spheroids at each time point, which shows the influence of seeding density on spheroid growth dynamics. Statistical analysis confirmed significant size differences between groups, except between spheroids formed from 2000 and 3000 cells on day 1, where no significant difference was observed.

These findings are in line with previous literature highlighting the aggressive and invasive characteristics of MDA-MB-231 and HeLa cells compared to less aggressive lines such as HEK-293 and HT-29. Our results further suggest that this aggressive phenotype may act as a limiting factor for spheroid formation in simple low-cost 3D culture platforms. Our observations align with previous studies indicating that MDA-MB-231 cells require extracellular matrix components, such as collagen I, to effectively form spheroids. Specifically, it has been demonstrated that in the absence of collagen I, MDA-MB-231 cells fail to form spheroids; however, supplementation with collagen I facilitates spheroid formation with defined boundaries. This suggested that the methylcellulose-based medium used in our study did not provide the necessary extracellular matrix support for spheroid formation in these aggressive cell lines. This addition clearly demonstrates the importance of selecting appropriate culture conditions tailored to the specific characteristics of each cell line, particularly when working with aggressive cancer cells like MDA-MB-231. It also highlights the necessity of incorporating suitable extracellular matrix components to facilitate spheroid formation in such contexts. It is important to note that the aggressiveness and invasiveness of such cell lines discussed here are based on their widely reported behavior in the literature[18–20]. Our study did not directly measure invasiveness but rather assessed the spheroid formation ability of these cell lines in relation to their known biological characteristics. Such a measurement can be performed by well reported 3D tumor spheroid invasion assays [21].

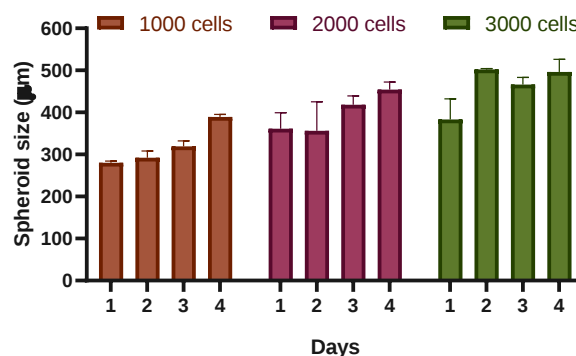


Figure 1. Growth profiles of spheroids formed with different initial cell numbers (1000, 2000, and 3000 cells per spheroid) over 4 days. Spheroid size was measured based on diameter using ImageJ analysis. Data are presented as mean $\pm$ standard deviation ($n = 3$). According to one-way ANOVA, spheroid size significantly increased within each seeding density group over time (days 1 to 4). Additionally, spheroid sizes were significantly different between groups seeded with 1000, 2000, and 3000 cells at each respective day, except between 2000 cells (day 1) and 3000 cells (day 1), where no significant difference was observed.

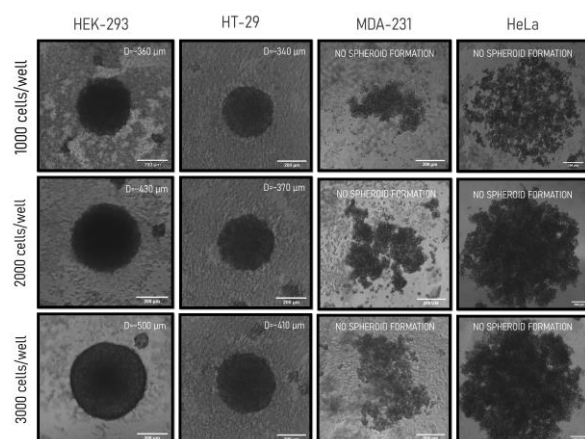


Figure 2. Bright-field images of cell lines tested for their ability of forming spheroids in Corning® 96-well clear round bottom TC-treated microplate. The images were taken on the 4th day after the first seeding ($t=1^{\text{st}}$ day). The scale bar represents 200 μm .

Cancer cell aggressiveness is a multifactorial and multidimensional aspect that cannot be solely described by a single parameter such as proliferation rate. While doubling time provides useful information regarding the proliferative capacity of cells *in vitro*, aggressiveness also encompasses characteristics such as invasiveness, migratory behavior, epithelial-to-mesenchymal transition, and resistance to cell death. In particular, highly invasive cancer cells often exhibit slower proliferation rates, as their phenotypic shift towards mesenchymal traits prioritizes migration over rapid cell division. This is commonly observed in mesenchymal-like breast cancer cells such as MDA-MB-231, which display high motility and reduced spheroid formation capacity despite a moderate doubling time. Conversely, epithelial-like cancer cells, such as HT-29, are characterized by rapid proliferation but lower invasive potential, facilitating compact spheroid formation in 3D cultures. Interestingly, HeLa cells, although fast-growing, often form less compact spheroids, possibly due to their partial epithelial phenotype and high proliferation-driven organization rather than cell-cell adhesion strength. Therefore, the ability of cancer cells to form spheroids is influenced by a complex interplay between proliferation, adhesion, and invasiveness, reflecting their diverse tumorigenic behaviors. The detailed characteristics of the cell lines used in this study, including cancer type, tumor classification, doubling time, and general aggressiveness profile, together with their corresponding Cellosaurus IDs, are summarized in Table 1. Cellosaurus is a widely used and curated cell line knowledge resource that provides standardized information about cell line origin, properties, and experimental use [22].

Table 1. Summary of cancer type, tumor classification, doubling time, and general aggressiveness profile of the selected cell lines used in this study. The Cellosaurus IDs of each cell line are also provided for reference. Doubling times were extracted from Cellosaurus, which cites different studies reported on the given cell line.

Cell Line	Cancer Type	Tumor Classification	Doubling Time	Invasiveness	General Aggressiveness Profile	Cellosaurus ID	Ref
MDA-MB-231	Breast adenocarcinoma	Triple-negative, invasive ductal carcinoma (mesenchymal-like)	~25-42 h	89% $\pm$ 4% of cells invaded within the 48 h of culture	High invasiveness, high motility, poor spheroid formation	CVCL_0062	[23]
HeLa	Cervical carcinoma	HPV18-positive epithelial-like carcinoma	~31-48 h	Reported as aggressive	Fast proliferation, moderate invasiveness, variable spheroid formation	CVCL_0030	[24]
HT-29	Colorectal adenocarcinoma	Moderately differentiated colon cancer (epithelial-like)	~19.5-40 h	1.8% (range: 0–2.9%) of seeded cells invaded within 40 hours	Fast proliferation, low invasiveness, compact spheroid formation	CVCL_0320	[25]
HEK293	Embryonic kidney	Immortalized human embryonic kidney cells	~24-30 h	No aggressiveness	Non-tumorigenic, non-invasive, no spheroid formation tendency	CVCL_0045	[26]

3.2. Spheroid formation ability in AggreWell™800

Bearing in mind this hypothesis, we tested AggreWell™800 (STEMCELL Technologies), a platform specifically designed for 3D cell cultures, to evaluate the spheroid formation ability of HeLa cells, which failed to form spheroids in commercial round bottom microplates. Unlike the Corning 96-well clear round bottom TC-treated microplates, which require the use of METHOCEL® to increase medium viscosity and restrict cell movement, the AggreWell™800 system uses liquid culture media, facilitating enhanced cell aggregation. The geometry of AggreWell™800, featuring square-shaped microwells, ensures uniform cell distribution and guides cells toward the center, making it a more potent platform for 3D cell culture compared to traditional round bottom microplates (Figure 3).

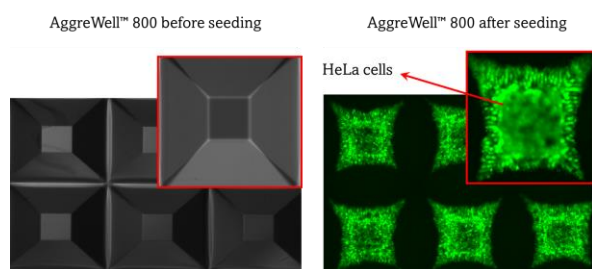


Figure 3. Microscopic images of AggreWell™800, a commercial platform designed specifically for 3D cell cultures. The image on the left shows empty AggreWells before cell seeding, while the image on the right illustrates AggreWells seeded with HeLa cells, demonstrating the initial distribution of cells within the wells.

To verify whether the inability to form spheroids was due to the platform or the intrinsic nature of HeLa cells, we conducted this experiment solely with HeLa cells. The cells were analyzed over an 8-day period (Figure 4), and at the end of the incubation, an attempt was made to retrieve the spheroids using a pipette specifically designed for spheroid handling. However, the retrieved structures were neither rigid nor round, with cells not efficiently attached to one another (Figure 5). This observation led to the conclusion that the inability to form spheroids was inherent to the nature of HeLa cells, as even the optimized AggreWell™800 platform could not facilitate proper spheroid formation.

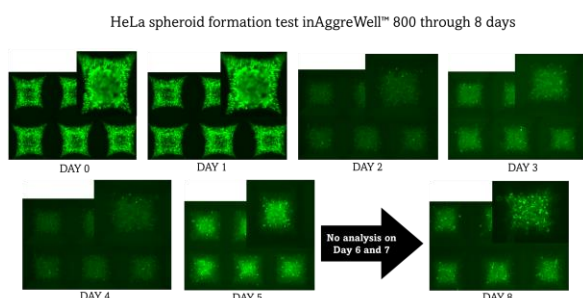


Figure 4. Fluorescent microscopic images showing HeLa cells cultured in AggreWell™800 over 8 days. The progression of cell aggregation is observed across the time points, with the initial clustering evident on Day 1. However, the cells failed to form rigid and cohesive spheroids, with the structures remaining loose and irregular throughout the culture period. No analysis was performed on Days 6 and 7. The inset images highlight the central aggregation of cells within the AggreWell microwells at specific time points.

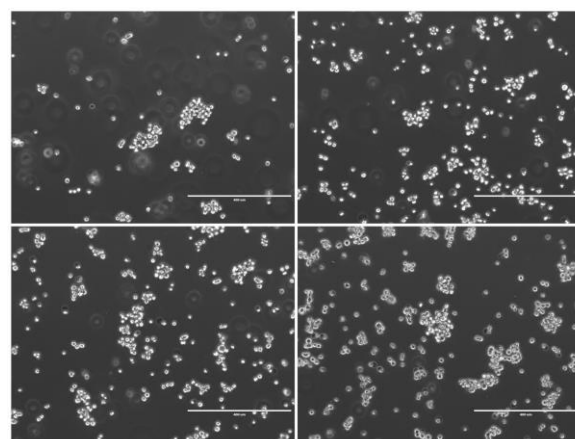


Figure 5. Microscopic image of HeLa cells after removal from AggreWell™800 and subsequent seeding onto a round cell culture flask. The cells are observed in aggregated or single-cell forms, with no visible spheroid structures. The scale bar represents 400 μm in all pictures.

3.3. Viability of Cells Forming Spheroids

To investigate whether the inability of HeLa cells to form spheroids in AggreWell™800 was due to a lack of cellular health, we analyzed the viability of HeLa cells cultured in the platform. After removing the cells from the wells, their viability was assessed using Via1-Cassette™ in the NucleoCounter® NC-3000™. The NucleoCounter® NC-3000™ utilizes Via1-Cassette™, a specialized consumable containing two immobilized fluorophores, acridine orange (AO) and DAPI. Acridine orange is a cell-permeable dye that intercalates with DNA in both live and dead cells, emitting a green fluorescence. DAPI, on the other hand, is impermeable to live cells and specifically stains the nuclei of dead cells, emitting a blue fluorescence. According to our measurements, cell viability of HeLa cells was over 90% after culturing in AggreWell™800 for 7 days, showing the cells were healthy and couldn't form spheroids due to their nature.

IV. CONCLUSION

3D spheroid models are invaluable tools in cancer research and offer more physiologically relevant platforms compared to traditional 2D cultures for studying tumour biology, drug response, and cellular behaviour. This study highlighted the variability in spheroid-forming ability among four distinct cell lines—HEK-293, HT-29, MDA-MB-231, and HeLa—using commercial platforms such as round bottom microplates and AggreWell™800. While HEK-293 and HT-29 cells formed compact, well-defined spheroids, the aggressive and invasive MDA-MB-231 and HeLa cells failed to form cohesive spheroids, even under optimized conditions. These findings show the critical role of cell line characteristics, such as invasiveness and aggregation potential, in determining their suitability for 3D culture systems. Furthermore, the viability analysis confirmed that the inability of HeLa cells to form spheroids was not due to poor

cellular health but rather an intrinsic property of the cell line. This study draws attention to practical limitations in spheroid formation for commonly used aggressive cancer cell lines. Our observations suggest that even with optimized platforms, certain cell lines may not be suitable for standard 3D drug testing models. While the use of methylcellulose-based media and standard round-bottom plates is well established, our study highlights that cellular aggressiveness — particularly invasiveness — may considerably limit spheroid formation even under optimized conditions. While we did not experimentally evaluate invasiveness parameters such as migration or invasion assays, our study provides insight into how reported aggressive characteristics of certain cell lines might influence their ability to form spheroids under standardized 3D culture conditions. We hope this study provides a practical reference for researchers when selecting appropriate 3D culture models, especially for aggressive cancer cell lines commonly used in drug testing. Understanding these differences is essential for selecting appropriate models in 3D culture-based cancer research and for improving the development of therapeutic strategies targeting tumor heterogeneity.

ACKNOWLEDGEMENT

Ismail Eş acknowledges the financial support of Sao Paulo Research Foundation (FAPESP), Brazil (Grant# 2015/14468-0 and 2018/23895-7)

REFERENCES

- [1] Ferlay, J., Colombet, M., Soerjomataram, I., Parkin, D.M., Piñeros, M., Znaor, A., & Bray, F. (2021). Cancer Statistics for the Year 2020: An Overview. *International Journal of Cancer*, 149, 778-789.
- [2] DiMasi, J.A., Reichert, J.M., Feldman, L., & Malins, A. (2013). Clinical Approval Success Rates for Investigational Cancer Drugs. *Clinical Pharmacology & Therapeutics*, 94, 329-335.
- [3] Wei, F., Wang, S., & Gou, X. (2021). A Review for Cell-based Screening Methods in Drug Discovery. *Biophysics Reports*, 7, 504.
- [4] Kapalczyńska, M., Kolenda, T., Przybyła, W., Zajackowska, M., Teresiak, A., Filas, V., Ibbs, M., Bliźniak, R., Łuczewski, Ł., & Lamperska, K. (2018). 2D and 3D Cell Cultures - A Comparison of Different Types of Cancer Cell Cultures. *Archives of Medical Science*, 14, 910-919.
- [5] Fang, Y., & Eglen, R.M. (2017). Three-dimensional Cell Cultures in Drug Discovery and Development. *SLAS Discovery: Advancing Life Sciences R&D*, 22, 456-472.
- [6] Dyson, P.J. (2019). The Rise of 3D Cellular Spheroids: Efficient Culture via Upward Growth from a Superamphiphobic Surface. *National Science Review*, 6, 1068-1069.
- [7] Wang, X., Wang, Z., Zhai, W., Wang, F., Ge, Z., Yu, H., & Yang, W. (2021). Engineering Biological Tissues from the Bottom-up: Recent Advances and Future Prospects. *Micromachines*, 13, 75.
- [8] Antoni, D., Burckel, H., Josset, E., & Noel, G. (2015). Three-dimensional Cell Culture: A Breakthrough in Vivo. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 5517-5527.
- [9] Kronemberger, G.S., Matsui, R.A.M., de Castro, G.A.S., Granjeiro, J.M., & Baptista, L.S. (2020). Cartilage and Bone Tissue Engineering Using Adipose Stromal/Stem Cells Spheroids as Building Blocks. *World Journal of Stem Cells*, 12, 110.
- [10] Ryu, N.E., Lee, S.H., & Park, H. (2019). Spheroid Culture System Methods and Applications for Mesenchymal Stem Cells. *Cells*, 8, 1620.
- [11] Roy, S.M., Garg, V., Barman, S., Ghosh, C., Maity, A.R., & Ghosh, S.K. (2021). Kinetics of Nanomedicine in Tumor Spheroid as an In Vitro Model System for Efficient Tumor-targeted Drug Delivery with Insights from Mathematical Models. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 785937.
- [12] Morán, M.C., Cirisano, F., & Ferrari, M. (2023). Spheroid Formation and Recovery Using Superhydrophobic Coating for Regenerative Purposes. *Pharmaceutics*, 15, 2226.
- [13] Gaitán-Salvatella, I., López-Villegas, E.O., González-Alva, P., Susate-Olmos, F., & Álvarez-Pérez, M.A. (2021). Case Report: Formation of 3D Osteoblast Spheroid Under Magnetic Levitation for Bone Tissue Engineering. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 8, 672518.
- [14] Rasouli, M., Safari, F., Kanani, M.H., & Ahvati, H. (2024). Principles of Hanging Drop Method (Spheroid Formation) in Cell Culture. Springer.
- [15] Anil-Inevi, M., Yaman, S., Yildiz, A.A., Mese, G., Yalcin-Ozuysal, O., Tekin, H.C., & Ozcivici, E. (2018). Biofabrication of In Situ Self Assembled 3D Cell Cultures in a Weightlessness Environment Generated Using Magnetic Levitation. *Scientific Reports*, 8, 7239.
- [16] Minamikawa-Tachino, R., Ogura, K., Ito, A., & Nagayama, K. (2020). Time-lapse Imaging of HeLa Spheroids in Soft Agar Culture Provides Virtual Inner Proliferative Activity. *PLoS One*, 15, e0231774.
- [17] Stepanenko, A.A., & Dmitrenko, V.V. (2015). HEK293 in Cell Biology and Cancer Research: Phenotype, Karyotype, Tumorigenicity, and Stress-induced Genome-phenotype Evolution. *Gene*, 569, 182-190.

-
- [18] Gest, C., Joimel, U., Huang, L., Pritchard, L.L., Petit, A., Dulong, C., Buquet, C., Hu, C.Q., Mirshahi, P., & Laurent, M. (2013). Rac3 Induces a Molecular Pathway Triggering Breast Cancer Cell Aggressiveness: Differences in MDA-MB-231 and MCF-7 Breast Cancer Cell Lines. *BMC Cancer*, 13, 1-14.
- [19] Sukjoi, W., Young, C., Acland, M., Siritutsoontorn, S., Roytrakul, S., Klingler-Hoffmann, M., Hoffmann, P., & Jitrapakdee, S. (2024). Proteomic Analysis of Holocarboxylase Synthetase Deficient-MDA-MB-231 Breast Cancer Cells Revealed the Biochemical Changes Associated with Cell Death, Impaired Growth Signaling, and Metabolism. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 10, 1250423.
- [20] Zhong, Z., Pannu, V., Rosenow, M., Stark, A., & Spetzler, D. (2018). KIAA0100 Modulates Cancer Cell Aggression Behavior of MDA-MB-231 Through Microtubule and Heat Shock Proteins. *Cancers*, 10, 180.
- [21] Vinci, M., Box, C., & Eccles, S.A. (2015). Three-dimensional (3D) Tumor Spheroid Invasion Assay. *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 52686.
- [22] Bairoch, A. (2018). The Cellosaurus, a Cell-line Knowledge Resource. *Journal of Biomolecular Techniques: JBT*, 29, 25.
- [23] Ellis, K., & Wood, R. (2023). The Comparative Invasiveness of Endometriotic Cell Lines to Breast and Endometrial Cancer Cell Lines. *Biomolecules*, 13, 1003.
- [24] Lucey, B.P., Nelson-Rees, W.A., & Hutchins, G.M. (2009). Henrietta Lacks, HeLa Cells, and Cell Culture Contamination. *Archives of Pathology & Laboratory Medicine*, 133, 1463-1467.
- [25] De Both, N.J., Vermey, M., Dinjens, W.N., & Bosman, F.T. (1999). A Comparative Evaluation of Various Invasion Assays Testing Colon Carcinoma Cell Lines. *British Journal of Cancer*, 81, 934-941.
- [26] Alberti, L., Losi, L., Leyvraz, S., & Benhattar, J. (2015). Different Effects of BORIS/CTCF on Stemness Gene Expression, Sphere Formation and Cell Survival in Epithelial Cancer Stem Cells. *PLoS One*, 10, e0132977.

EkoBot: Türkçe Destekli Akıllı Sanal Akademik Danışman

EkoBot: Intelligent Virtual Academic Advisor with Turkish Support

Ayça KUMLUCA TOPALLI ¹ 

¹İzmir Ekonomi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü, İzmir, Türkiye

Öz

Bu çalışmada üniversite öğrencilerine sanal danışman olarak yardımcı olabilecek, Türkçe destekli bir akıllı yazılım, EkoBot sunulmuştur. Bu yazılımla öğrencilerin sorularına doğru ve hızlı bir şekilde yanıt almaları hedeflenmiştir. Bunun için yapay zekâ destekli büyük dil modellerinden yararlanılmıştır. Büyük dil modelinin, eğitimi sırasında kullanılmamış, üniversite yönetmeliklerine dayalı yanıtlar verebilmesi için bu belgeler modele dışardan verilmiş ve “almayla artırılmış üretim” yöntemi kullanılmıştır. Önerilen sistemin performansını ölçmek için ucu açık ya da olumlu ve olumsuz yanıtlara sahip 100 adet soru üretilmiştir. Alma kısmında, soruya en çok benzeyen beş bağlam metni ile %100 başarımla elde edilmiştir. Üretim kısmında, yanıt ile bağlam benzerlikleri 0,82 olarak bulunmuştur. Ayrıca önerilen çözümün bir Web sayfası olarak çalışan bir prototipi hazırlanmış ve öğrencilerin kullanımına sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Doğal dil işleme, kosinüs benzerliği, istem mühendisliği, büyük dil modelleri, yapay zekâ, almayla artırılmış üretim

Abstract

In this study, EkoBot, an AI-powered software with Turkish language support, designed to assist university students as a virtual advisor, is presented. The goal of this software is to provide students with accurate and prompt answers to their questions. For this purpose, large language models supported by artificial intelligence were utilized. To enable the large language model to give responses based on university regulations, which were not included in its training, these documents were provided to the model externally, and a “retrieval-augmented generation” method was employed. To evaluate the performance of the proposed system, 100 questions with open-ended or positive and negative responses were generated. In the retrieval phase, 100% success was achieved with the five context texts most similar to the question. In the generation phase, the similarity between the responses and the context was found to be 0.82. Additionally, a prototype of the proposed solution was developed as a Web page and made available for the students.

Keywords: Natural language processing, cosine similarity, prompt engineering, large language models, artificial intelligence, retrieval augmented generation

1. GİRİŞ

Üniversiteler gibi yüksek eğitim kurumlarında, öğrencilerin dersler, kayıtlar, sınavlar gibi çeşitli konularda soruları olmaktadır. Bu soruların yanıtları, çoğunlukla eğitim ve öğretimle ilgili yönetmeliklerde olduğu halde, öğrencilerin bu yönetmeliklerden haberdar olmaması ya da sayfalarca uzunlukta belgeler içinde aradıkları yanıtları bulamamaları nedeniyle, sorularını akademik danışmanlara ya da idari çalışanlara iletmektedirler. Özellikle kayıt zamanı gibi yoğun dönemlerde, bu tür soruları tek tek yanıtlamak hem akademik hem de idari çalışanlar için zor bir durumdur. Ayrıca çalışanlar yanıtları yalnızca mesai saatleri içinde verebilirler. Öğrencilerin bir çalışana gitmeden önce, sorusunu zamandan bağımsız olarak yönelebileceği otomatik bir sistem oldukça verimli olacaktır.

Dijitalleşme sayesinde, kurumlarda üretilen ve saklanan verilerin büyük boyutlara ulaşması, verimliliği artırmakla birlikte, bu büyük verinin içinde istenilen bilginin bulunmasının zorlaşmasına yol açmıştır. Eğitim kurumlarında da çeşitli formatlarda (pdf, docx, html, vb.) ve dâhili veri tabanlarında saklanan ve gün geçtikçe çoğalan metinler içinde geleneksel yöntemlerle arama yapmak artık uygunluğunu yitirmektedir. Söz konusu otomatik sistemin bu metinleri ortak bir biçime sokup akıllı bir yöntem desteği ile hızlı ve doğru arama yapabilmesi gerekir.

Akıllı sohbet botları, yapay zekâ ve doğal dil işleme (Natural Language Processing, NLP) yöntemlerini kullanarak kullanıcıların sorularını anlayıp büyük dil modelleri (Large Language Models, LLM) sayesinde dilbilgisi kurallarına uygun yanıtlar üreten otomatik sistemlerdir [1].

LLM'ler, soru yanıtlama, tümce tamamlama, çeviri yapma gibi çeşitli metinler oluşturma amacıyla geliştirilen, büyük veri ile eğitilmiş milyarlarca parametrelerden oluşan, üretken yapay zekâ (Generative AI, GenAI) ürünleridir ve son zamanlarda hemen her alanda çok başarılı sonuçlar verdiklerinden kullanımları artmıştır. LLM temelli bir akıllı bot, eğitim kurumlarında öğrencilerin yönetmeliklerle ilgili sorularını yanıtlama biçiminde kullanılmaya uygun bir çözümdür.

Ancak bilindiği gibi bir LLM, ancak kendi eğitiminde kullanılan bilgilerle sınırlı ölçülerde doğru yanıtlar üretebilir. Kurumsal yönetmelikler gibi özel bilgiler, genel bir LLM eğitiminde kullanılmadığı için o kurumu ilgilendiren özel sorulara yanlış yanıt vermesi doğal bir sonuçtur. Öte yandan kullanıcıların bu teknolojiye duydukları güvenin sarsılmaması için, LLM'in sorulan sorulara doğru yanıt vermesi son derece önemlidir. Dolayısıyla, eğitim dışında kalan özel bilgilerle ilgili soru sorulan durumlarda LLM kullanmak isteniyorsa, bu bilgilerin de sisteme katıldığı ve soruların bu bilgilere dayanarak yanıtladığı bir çözüm kullanmak gerekir.

Almayla artırılmış üretim (Retrieval Augmented Generation, RAG), LLM'in tekrar eğitilmesine ya da ince ayara tutulmasına gerek kalmadan, bir kuruma, konuya vb. özgü güncel bilgileri ve ek verileri kullanarak yanıtlar ürettiği yöntemdir [2, 3, 4]. LLM'lerin kullanım alanını genişlettiği, daha iyi yanıtlar verdiği ve yüksek bilgisayar gücü gerektirmediği için RAG yöntemi akademik ve endüstriyel araştırmacılarca benimsenmiştir [5, 6, 7].

RAG'in kullandığı ek veriler, sürekli olarak yenilenebilir ya da genişletilebilir ve bu durum LLM yapısını değiştirmez. Bu da büyük bir maliyet gerektirmediğinden RAG yönteminin bir avantajıdır. Ayrıca RAG sistemlerinde, sorulan sorunun yanıtı, verilen bağlamın içerisinde yoksa, LLM'in yanlış yanıt üretmek yerine soruyu yanıtlamak için yeterli bilgisi olmadığını söylemesi sağlanabildiğinden, güvenilirlerdir.

Bu çalışmada, RAG yöntemi kullanılarak, sorulara İzmir Ekonomi Üniversitesi "Ön Lisans ve Lisans Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" [8] belgesinde

yer alan Türkçe bilgilere dayalı yanıtlar üreten, sorunun yanıtı bu belgede yoksa "bu soruyu yanıtlamak için yeterli bilgim yok" şeklinde dönüş yapan sanal bot, EkoBot, önerilmektedir. Bu sayede öğrenciler sorularına 24/7 yanıt alabileceklerdir. Sözü geçen yönetmelik gerçek hayatta kullanılan bir belgedir, dolayısıyla gerçekte karşılaşılabilecek durumlara uygun bir çözüm sunulmaktadır. Ayrıca, Türkçe destekli sanal akademik danışmanlık çözümü üzerine bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu açıdan burada önerilen sistem, bu alanda bir ilktir.

1.1. Literatür Taraması

Akıllı sanal sohbet botları birçok alanda kullanılmaktadır. Eğitim alanındaki botlarla ilgili akademik çalışmalardan en yenileri kronolojik sırada aşağıda özetlenmiştir.

RAG yöntemi geliştirilmeden, 2020 yılı öncesinde yapılan çalışmalarda, öğrencilerle sohbet botu altyapısı olarak yapay zekâ işaretleme dilinin (Artificial Intelligence Markup Language, AIML) sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [9, 10, 11]. AIML, özellikle sohbet botları geliştirmek için kullanılan bir programlama dili olmuştur fakat yalnızca belli kalıplara uyan girdilere çıktı üretebildiği ve kural tabanlı olduğu için LLM yöntemine kıyasla kısıtlı başarımlar göstermiştir.

Uzun-kısa dönemli bellek (Long-Short Term Memory, LSTM), adlandırılmış varlık tanıma (Named Entity Recognition, NER) yöntemleri de bu dönemde botlarda kullanılan yapay zekâ öğrenme modellerinden olmuştur [12, 13]. Bu yöntemler, öz dikkat mekanizması fikrine dayalı olan dönüştürücü mimarisi üzerine kurulu LLM yöntemi kadar başarılı olamamıştır. Akıllı bot altyapısı olarak Amazon LEX'i [14], IBM Watson'u [15], Telegram'ı [16], Facebook Messenger'i [17] ya da DialogFlow'u [18] kullanan çalışmalar bulunmaktadır.

2020 yılı sonrasında, RAG yöntemini kullanmayıp diğer makine öğrenme teknikleriyle NLP yöntemlerini birleştiren akıllı sanal bot araştırmalarına rastlanmaktadır. Bunlardan Nguyen vd. [19] Rasa platformunu, Ula vd. [20] K-en yakın komşu algoritmasını, Verma vd. [21] RAG yönteminin bir parçası olan benzerlik kistasını kullanmıştır.

RAG yöntemi, yukarıda sözü edilen geleneksel yapay zekâ algoritmalarına kıyasla daha doğru ve bağlam içi yanıt verdiği, modelin eğitiminde kullanılmayan verileri de kullanarak daha iyi genelleme yaptığı için tercih edilir duruma gelmiştir. Ayrıca RAG yapısında yer alan, dönüştürücü tabanlı LLM sayesinde, özel

sözcük kalıplarının kullanımını gerektirmeyen, daha doğal bir konuşma ortamı sağlanmıştır.

Üniversite ortamı için RAG destekli sohbet botu üzerine yapılan akademik çalışmalardan birinde, açık kod uygulama altyapısı olan Streamlit tercih edilmiştir [22]. Bu İngilizce bot çalışmasında vektör gömme işlemi Hugging Face platformundan “all-MiniLM-L6-v2” algoritması ile, LLM kısmı ise OpenAI GPT-3 modeli ile yapılmıştır. Başka bir çalışmada Maryamah vd. üniversite öğrenci adaylarının İngilizce sorularını yanıtlamak üzere RAG tabanlı bir bot tasarlamışlar ve vektör gömme işlemi için OpenAI şirketinin “Ada” algoritmasını kullanmışlardır. LLM olarak GPT-3.5 Turbo modelini seçmişlerdir [23].

Büyük dil modelleri zamanla gelişmektedir. Buna paralel olarak yapılan akademik çalışmalarda gün geçtikçe daha iyi modeller kullanılmakta ve daha iyi sonuçlar alınmaktadır; alınmaya da devam edilecektir. Bu konuda 2024 yılında yapılmış en güncel çalışmalardan birinde Neupane vd., OpenAI şirketinin şu ana kadar en iyi sonuç veren “text-embedding-3-large” algoritması ile vektör gömme işlemini yapmış, LLM olarak yine GPT-3.5 Turbo modelini kullanmışlardır [24]. Bu çalışma da diğerleri gibi İngilizce desteklidir.

İngilizce, yapısı gereği eksiz bir dil olduğu için gramer kurallarını yapay zekâ modellerine öğretmek daha kolaydır. Bu nedenle literatürdeki akıllı bot çalışmalarının büyük bölümü İngilizce için yapılmıştır. Eğitim alanında diğer diller için yapılmış sınırlı sayıda bot araştırmalarına örnek olarak şu çalışmalar gösterilebilir: Portekizce için Krassmann vd. tarafından geliştirilen e-öğrenme uygulaması [10], Endonezya dili için Chandra ve Suyanto’nun geliştirdiği NER uygulaması [12], Ukraynaca için Priadko vd. tarafından Telegram altyapısı ile geliştirilen model [16], Vietnamca için Nguyen vd. tarafından Rasa platformunda çalıştırılan uygulama [19] ve Nguyen vd. tarafından geliştirilen e-öğrenme modeli [25], Fransızca için Ait Baha vd. tarafından geliştirilen e-öğrenme uygulaması [26], Arapça için Aloqayli ve Abdelhafez’in geliştirdiği uygulama [27] ve Alharethi’nin geliştirdiği e-öğrenme modeli [28], Tayvanca için Lee vd. tarafından geliştirilen e-öğrenme uygulaması [29], İspanyolca için Martinez-Araneda vd. tarafından geliştirilen e-öğrenme uygulaması [30].

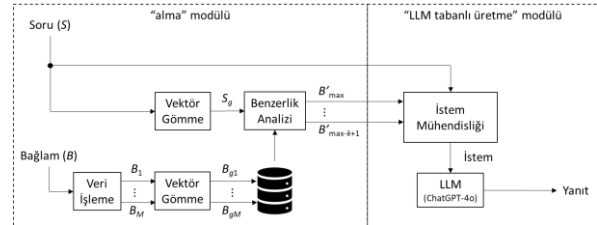
Bu bölümde sözü edilen ve kısaca tanıtılan çalışmaların birbirleriyle ve burada önerilen yöntem ile kıyaslaması için Tablo 1 hazırlanmıştır. Bu tabloda özellikle dil belirtilmeyen çalışmaların İngilizce destekli bir bot üzerine olduğu varsayılmıştır.

Yukarıda söz edilen çalışmalardan da görüldüğü gibi, Türkçe dili için gerçekleştirilmiş, eğitim alanında hizmet veren, RAG tabanlı akıllı bir sanal danışman botuna literatürde rastlanmamıştır. Ayrıca, LLM’lerin günümüzde en gelişmiş olan modeli GPT-4o ile yapılmış, Türkçe destekli, üniversite öğrencilerinin sorularını yanıtlamaya yönelik, RAG esaslı bir çalışma yoktur. Bu açılarından, bu çalışmada önerilen özgün sistem, bu alana bir yenilik getirmektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

RAG, “alma” ve “LLM tabanlı üretme” modüllerinden oluşur [31]. LLM’e bir API üzerinden erişildiği ve uzaktan hizmet alındığı için güçlü bir yerel işlemciye gerek duyulmaz. Fakat, sorulan sorunun yanıtını bulmak için kullanılacak kurum içi bilgilerin de LLM’e bağlam olarak gönderilmesi gerekir. Bu durum iki temel sorun yaratır: ilk olarak LLM’lerin girdi olarak kabul ettiği istemlerin boyutu kısıtlıdır ve kurum belgeleri genelde bu boyutu aşacak uzunluktadır ve ikinci olarak, istemlerin boyutu arttıkça LLM’lerin ücretlendirmesi artar. Bu nedenlerden dolayı, kurum için belgelerden, sorulan soruyla en ilgili olanları bağlam olarak seçilmelidir. Bu seçme işlemini “alma” modülü gerçekleştirir. “LLM tabanlı üretme” modülü ise, soru ve seçilen kurum bilgilerini bir istem haline getirip LLM’e verir, LLM’in NLP kuralları ile ürettiği yanıtı kullanıcıya sunar.

Önerilen sistemin blok şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. RAG tabanlı akıllı bot blok şeması

2.1. İlk Aşama: “Alma” Modülü

RAG tabanlı bu sistemde, Bağlam (B) olarak belirtilen girdiler, LLM’in eğitiminde kullanılmayan, İzmir Ekonomi Üniversitesi’ne ait eğitim ve öğretimle ilgili yönetmelik belgeleridir [8]. Sistemin amacı, öğrencilerin sorduğu soruları, bu yönetmelik belgesindeki bilgilere göre ve dil bilgisi kurallarına uygun olarak yanıtlamaktır.

HTML formatında ve Türkçe dilinde maddelerden oluşan bağlam, öncelikle veri işleme aşamasından geçirilmiştir. Bu aşamada, HTML’den TXT formatına çevirme, yazım hatalarının kontrolü, vb. işlemler yapılmış, her biri tek bir yönetmelik maddesinden oluşan M adet metin ($B_1, \dots, B_M$) elde edilmiştir. Bu

metinlerin matematiksel olarak işlenebilmesi için sayısal formata dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu işlem, vektör gömme algoritması ile yapılmış ve

bağlam belgelerinin her bir maddesi, N boyutlu vektörlere dönüştürülmüştür $(B_{g1}, \dots, B_{gM})$.

Tablo 1. Literatürdeki benzer akıllı bot çalışmalarının önerilen yöntemle kıyaslaması

Çalışma	Yıl	Dil	Uygulama	Yöntem (RAG/Diğer)
Ranoliya vd. [9]	2017	İngilizce	Yönetmelikler	Diğer
Adams vd. [14], Nwankwo [11], Shivam vd. [17]	2018	İngilizce	Yönetmelikler	Diğer
Krassman vd. [10]	2019	Portekizce	E-öğrenme	Diğer
Chandra ve Suyanto [12]	2019	Endonezya dili	Yönetmelikler	Diğer
Gbenga vd. [15], Tommy vd. [13]	2020	İngilizce	Yönetmelikler	Diğer
Priadko [16]	2020	Ukraynaca	Yönetmelikler	Diğer
Mendoza vd. [18]	2020	İngilizce	E-öğrenme	Diğer
Nguyen vd. [19]	2021	Vietnamca	Yönetmelikler	Diğer
Nguyen vd. [25]	2021	Vietnamca	E-öğrenme	Diğer
Lee vd. [29]	2022	Tayvanca	E-öğrenme	Diğer
Verma vd. [21]	2022	İngilizce	Yönetmelikler	RAG (kısmen) Vektör gömme: CountVectorizer LLM: Yok
Ula vd. [20]	2023	Fransızca	E-öğrenme	Diğer
Ait Baha vd. [26]	2023	Fransızca	E-öğrenme	Diğer
Aloqayli ve Abdelhafez [27]	2023	Arapça	Yönetmelikler	Diğer
Alharethi [28]	2023	Arapça	E-öğrenme	Diğer
Martinez-Araneda [30]	2023	İspanyolca	E-öğrenme	Diğer
Oliveira ve Matos [22]	2023	İngilizce	Yönetmelikler	RAG Vektör gömme: all-MiniLM-L6-v2 LLM: GPT-3
Maryamah vd. [23]	2024	İngilizce	Yönetmelikler	RAG Vektör gömme: Ada LLM: GPT-3.5 Turbo
Neupane vd. [24]	2024	İngilizce	Yönetmelikler	RAG Vektör gömme: text-embedding-3-large LLM: GPT-3.5 Turbo
Önerilen yöntem	2025	Türkçe	Yönetmelikler	RAG Vektör gömme: text-embedding-3-large LLM: GPT-4o

Bağlam vektörleri her soru-yanıt ikilisi için yeniden kullanılacakları için, gömme işlemini tekrarlamak zaman kaybına yol açacağından bu işlem yalnızca bir kere yapılmış ve bağlam vektörleri bir veri tabanında saklanmıştır. Kullanıcı bir soru sorduğunda (S), bu soru da aynı vektör gömme algoritmasına girmiş ve soru vektörü (S_g) elde edilmiştir. Vektör gömme işlemi için Türkçe destekli farklı kaynaklar denenmiş,

sonuçlar “Bulgular ve Yorumlar” bölümünde verilmiştir.

Bir sonraki aşamada, sorulan sorunun, bağlamın hangi maddeleri ile en çok ilişkili olduğu bulunmuştur. Bunun için, soru vektörü (S_g) ile her bir bağlam maddesi vektörü (B_{gi}) arasında benzerlik analizi yapılmıştır. Benzerlik kriteri olarak, en bilinen yöntem

olan kosinüs benzerliği seçilmiş ve vektörler arasındaki benzerlik (c_i), Eşitlik (1)'deki gibi hesaplanmıştır:

$$c_i = \cos(S_g, B_{gi}) = \frac{\langle S_g, B_{gi} \rangle}{\|S_g\| \cdot \|B_{gi}\|} \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (1)$$

Eşitlik (1)'deki $\langle S_g, B_{gi} \rangle$ ifadesi S_g vektörü ile B_{gi} vektörünün iç çarpımını, $\|S_g\|$ ve $\|B_{gi}\|$ ifadeleri ise, sırasıyla S_g vektörü ile B_{gi} vektörünün Öklid uzaklığını göstermektedir. Hesaplanan c_i değeri ne kadar yüksekse B_{gi} vektörü de S_g vektörüne o kadar benzerdir. Bu da, B_i bağlam maddesinin S sorusuna anlamsal olarak yakınlığını temsil etmektedir. İlgili gömme vektörleri en yüksek “ k ” kosinüs benzerliğini veren bağlam maddeleri ($B'_{max}, B'_{max-1}, \dots, B'_{max-k+1}$) benzerlik analizinin çıktıları olarak seçilmiştir.

2.2 Son Aşama: “LLM Tabanlı Üretme” Modülü

Bu modülün girdileri, soru metni (S) ile bu soruya anlamsal olarak en yakın, “alma” modülünde bulunmuş k adet bağlam metnidir ($B'_{max}, B'_{max-1}, \dots, B'_{max-k+1}$). Bu girdiler, istem mühendisliği uygulanarak LLM'in daha iyi sonuç vermesi amacıyla zenginleştirilmiş, aşağıdaki gibi bir isteme dönüştürülmüştür:

“Altındaki soruyu verilen bağlama göre yanıtla, sorunun yanıtı verilen bağlam içinde yoksa ‘bu soruyu yanıtlayacak yeterli bilgi yok’ yaz.

Bağlam: [Bağlam]

Soru: [Soru]”

Hazırlanan bu istem, LLM'e girdi olarak verilmiştir. LLM seçiminde Türkçe desteği en önemli kriter olmuştur. Günümüzün en bilinen modellerinden, Türkçe'yi iyi anlayıp doğru yanıt verebilen OpenAI şirketinin GPT-4o modeli LLM olarak seçilmiştir.

LLM'in verdiği yanıt, en benzer bağlamı oluşturan yönetmelik maddeleriyle birlikte kullanıcıya sunulmuştur.

Önerilen sistemde, bağlama yeni belgeler ekleyerek kapsamı artırmak mümkündür. Bu işlem için, herhangi bir metin formatındaki yeni belgelerin maddelere ayrılması ve gömme algoritmasına sokularak vektör veri tabanında saklanması yeterlidir. Sistemin geri kalanında herhangi bir değişiklik yapılmasına gerek yoktur. Bu açıdan önerilen sistem, genişlemeye uygundur.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada bağlam olarak İEÜ “Ön Lisans ve Lisans Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği” [8] kullanılmıştır. Bu doküman, 49 maddeden oluşmaktadır. Çoğu maddenin alt bentleri de

bulunmaktadır. Vektör gömme işleminden önce, her bir bent bir paragraf olacak şekilde 183 parçaya ayrılmıştır ($M = 183$). Örnek bir paragraf şu şekildedir:

“MADDE 18. Ders yükü. (1) Bir öğrencinin her dönemde alacağı normal ders yükü 30 AKTS kredisidir. Tekrarlanan dersler normal ders yükünden sayılır.”

3.1 Vektör Gömme Bulguları

Metinlerin sayısal biçime dönüştürülmesi işlemi olan vektör gömmenin kalitesinin, RAG sisteminin başarımındaki etkisi büyüktür. Bu nedenle bu işlem dil kurallarına uygun olarak yapılmalıdır ve kullanılacak olan yazılım programı, Türkçe metinleri Türkçe dil kurallarına göre sayısal vektörlere çevirmelidir. Fakat Türkçe destekli vektör gömme yazılımları, İngilizce için olanlar kadar fazla ve yaygın değildir. İlk olarak, profesyonel modeller arasında en bilinen ve Türkçe'de en başarılı sonuçlar veren OpenAI şirketinin “text-embedding-3-large” modelinin gömme algoritması seçilmiştir (Algoritma-1). Bu model, metinleri en fazla 8191 token sayısına göre, boyutu $N = 3072$ olan vektörlere çevirmektedir.

Kıyaslama yapabilmek için bir de Hugging Face portalı taranmış ve en çok kullanılan Türkçe destekli, BERT tabanlı “bert-base-turkish-cased-mean-nli-stsb-tr” modeli kullanılmıştır (Algoritma-2). Bu model ile, en fazla 512 token sayısına göre, $N = 768$ boyutlu sayısal vektörler elde edilmiştir.

Her iki gömme modelini kullanırken, vektörlere dönüştürülen metinlerin token sayıları kontrol edilmiştir. Buradaki amaç, token sınırını aşan metin varsa onu bulup daha küçük parçalara bölmektir. Ne var ki kullanılan metinler yönetmelik maddeleri oldukları için kısa paragraflardan oluşmaktadırlar ve token sınırının içinde kalmaktadırlar. Algoritma-1'in ürettiği en küçük tokenli madde için token sayısı 31, en büyüğü için 618'dir. Algoritma-2 ise en küçük tokenli madde için 19 token, en büyüğü için 377 token kullanmıştır. Buradan, Algoritma-1'in Türkçe için daha fazla çeşitli token kullandığı anlaşılmaktadır.

Bu iki vektör gömme modeli ile ilgili bulgular bir sonraki bölümde, benzerlik analizi bulguları ile birlikte verilmiştir. Her iki modeli kullanmak için Python dilinde kod yazılmış ve modellere API yoluyla ulaşılmıştır.

3.2 Benzerlik Analizi Bulguları

RAG sistemindeki “alma” modülünün bağlamdaki yönetmelik maddelerinden sorulan soruya kosinüs benzerliği kriteriyle en benzer kaç tanesini almak gerektiği ile ilgili bir formül yoktur, buradaki k bir hiper-parametredir. Küçük bir k değeri kullanmak, az

sayıda madde ile soruyu yanıtlamaya çalışmak demek olacaktır ki, bazı durumlarda yeterli bağlam verilmediği için sorunun yanıtsız kalmasına neden olabilir. Öte yandan büyük bir k değeri kullanmak, hem benzerlik analizinde gereksiz yere zaman kaybetmeye hem de LLM'e gereğinden uzun bir bağlam verip odağı dağıtmaya ya da fazla ücret ödemeye yol açabilir. Dolayısıyla en iyi k değerini bulmak önemlidir.

Örneğin, “not ortalamam 2,35 bu dönem ilave kaç AKTS alabilirim?” sorusunun yanıtı, yönetmeliğin 18. maddesinin 2. bendinde yazmaktadır:

MADDE 18. Ders yükü. (2) Öğrenci normal ders yüküne ilave olarak; a) Genel not ortalaması 2,00 ve 2,49 arasında olan öğrenciler için; öğrencinin talebi ve danışmanın onayı ile toplamda 6 AKTS kredi, b) Genel not ortalaması en az 2,50 olan öğrenciler için öğrencinin talebi ve danışmanın onayı ile toplamda 12 AKTS kredi alabilirler.

Algoritma-1 ile oluşturulan gömme vektörleri üzerinden yapılan benzerlik analizinde en benzer 10 madde şunlar çıkmıştır:

Madde 26 (2), Geçici Madde 1 (2), Madde 18 (2), Madde 27 (1), Madde 18 (1), Madde 27 (2), Madde 24 (1), Madde 17 (3), Madde 3 (1c), Madde 26 (3).

Görüldüğü gibi, yanıtın olduğu Madde 18 (2), üçüncü sıradadır. Fakat Algoritma-2 ile oluşturulan gömme vektörleri üzerinden yapılan benzerlik analizinde, aynı soru için sıralama şu şekilde çıkmıştır:

Madde 24 (2), Madde 26 (2), Madde 23 (8), Madde 24 (3c), Madde 24 (3f), Madde 28 (1b), Madde 28 (1a), Madde 27 (1), Madde 18 (2).

Sıralamadan görüldüğü gibi, yanıtı içeren Madde 18 (2), 10. sırada yer almıştır. Bu örnek, Algoritma-1'in, Algoritma-2'ye kıyasla Türkçe'ye daha uygun gömme vektörler ürettiğini göstermektedir.

Sonucu genelleştirebilmek için, yönetmeliğin her maddesi ile ilgili en az bir tane olmak üzere, yukarıdaki örneğe benzer 100 adet soru hazırlanmıştır. Daha sonra farklı k değerleri için her soru ile, her iki gömme modelinin vektörlerini kullanarak benzerlik analizi yapılmış ve bulunan yönetmelik maddeleri kontrol edilmiştir. Her k değerinde, 100 sorudan kaç tanesi için doğru maddenin en benzer k madde içinde olduğu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı gömme vektörleri ile benzerlik analizi sonuçları

En benzer k madde	Algoritma-1	Algoritma-2
1	69	61
2	82	74
3	88	83
4	92	85
5	100	90
6	100	92
7	100	96
8	100	97
9	100	98
10	100	100

Tablo 2'de görüldüğü gibi, Algoritma-1'in gömme vektörleri ile alınan sonuçlarda, $k \leq 4$ için en benzer bulunan maddeler içinde doğru yanıtı içeren maddenin olduğu durumlar %100'den azdır. Ancak $k = 5$ için tüm sorulara doğru yanıtı içeren maddeler bulunmuştur. Bu, tüm sorular için en çok $k = 5$ maddeye bakmak yeterli demektir.

Yine Tablo 2'ye bakıldığında, Algoritma-1'in gömme vektörleri ile alınan sonuçların Algoritma-2'nin ürettiği vektörlerle alınan sonuçlardan daha iyi olduğu görülmektedir. Algoritma-1, beş yönetmelik maddesi içinde doğru yanıtı içeren maddeyi bulurken Algoritma-2 ile tüm sorulara doğru yanıt verebilmek için en benzer 10 maddeyi kullanmak gerekmektedir.

Burada vektör gömme modeli ile ilgili seçim yapılırken, sonuçların doğruluğunun yanı sıra dikkate alınması gereken diğer konu, Algoritma-1 ücretli iken (Eylül 2024 itibarı ile \$0.00013 / 1k token) Algoritma-2'nin ücretsiz olmasıdır.

Bu bölümdeki bulgulara ulaşmak için de yine Python dili kullanılmış ve gömme vektörlerinin kosinüs benzerliklerini bulmak için kod yazılmıştır.

3.3 LLM Bulguları

Bir önceki bölümde verilen vektör gömme ve benzerlik analizi sonuçları değerlendirilerek, bundan sonraki LLM denemelerine, Algoritma-1 ve $k = 5$ kosinüs benzerliği kullanılarak devam edilmiştir. Böylece, “alma” modülünün %100 doğru çalışacağı garanti edilmiştir.

LLM değerlendirme ölçütü olarak literatürde ROUGE [32] ve BLEU [33] gibi popüler yöntemler bulunmaktadır. Fakat, ROUGE genel olarak özet çıkarma, BLEU ise çeviri işlerini değerlendirmek için kullanıldığı için bu çalışmanın bağlamına uygun değildir. Ayrıca bu stratejilerin dayandıkları LLM içi sözcük olasılıklarına GPT-4o gibi kapalı sistemlerde erişim mümkün değildir.

Bu nedenlerle bu çalışmada kullanılan LLM olan GPT-4o modelini değerlendirmek üzere Zhang vd.'nin kullandığına yakın, kosinüs benzerliğine dayalı bir ölçüt kullanılmıştır [34]. Bunun için daha önce benzerlik analizinde kullanılan 100 soru burada da ele alınmıştır. Her soru ve en benzer beş bağlam maddesi isteme dönüştürülerek LLM'e verilmiş ve yanıt alınmıştır. LLM'in yanıtının ve sorulan sorunun yanıtını içeren bağlam maddesinin Algoritma-1 ile

gömme vektörleri oluşturulmuş; bu vektörlerin kosinüs benzerliği hesaplanmıştır. Sonuçlardan bir kesit Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3'te görüldüğü gibi, LLM'e farklı tipte sorular yöneltilmiştir. Sorulan 100 sorudan 57'si birinci sorudaki gibi ucu açık, 31'i ikinci sorudaki gibi olumlu, 12'si 100. sorudaki gibi olumsuz yanıtıdır.

Tablo 3. LLM yanıt örnekleri

No	Soru	Yanıtı içeren bağlam	LLM yanıtı	Benzerlik
1	Azami öğrenim süresi ne kadar?	MADDE 30. Öğrenim süresi. (2) Azami eğitim öğretim süresi, ön lisans programları için dört yıl (sekiz yarıyıl); lisans programları için yedi yıl (on dört yarıyıl), Tıp Fakültesi için dokuz yıl (on sekiz yarıyıl)'dır.	Azami eğitim öğretim süresi, ön lisans programları için dört yıl (sekiz yarıyıl), lisans programları için yedi yıl (on dört yarıyıl), Tıp Fakültesi için dokuz yıl (on sekiz yarıyıl) olarak belirlenmiştir.	0,98
2	Notuma itiraz edebilir miyim?	MADDE 25. Notlarda maddi hata. (1) Ön lisans ve lisans programlarında yer alan herhangi bir dersin değerlendirme sonucuna; ilanı tarihinden itibaren en geç üç iş günü içinde itiraz edilebilir. Öğrenci Bilgi Sistemi üzerinden açıklanan dönem sonu ders notları ile ilişkili herhangi bir maddi hatanın yapılmış olması halinde, düzeltme istemi, öğretim elemanının başvurusu üzerine ilgili Fakülte-Yüksekokul Yönetim Kurulu tarafından karara bağlanır.	Evet, itiraz edebilirsiniz. Ön lisans ve lisans programlarında yer alan herhangi bir dersin değerlendirme sonucuna, ilanı tarihinden itibaren en geç üç iş günü içinde itiraz edebilirsiniz.	0,81
...				
100	Dersler başladıktan sonra kaydımı sildirirsem ücretimi geri alabilir miyim?	MADDE 34. Ücretler. (4) Üniversiteye yeni kayıt olan öğrencilerden veya Üniversiteye devam eden öğrencilerden kayıt sildirme başvurusunu akademik takvimde ilan edilen derslerin başlangıç tarihine kadar yapanlara, ödedikleri öğrenim ücreti üzerinden yıllık öğrenim bedelinin %15'i kesilerek kalan miktar iade edilir. Derslerin başlangıç tarihinden sonra kayıt sildirme başvurusunu yapan öğrencilerin ise ödemiş oldukları ücretler iade edilmez.	Derslerin başlangıç tarihinden sonra kayıt sildirme başvurusunu yapan öğrencilerin ödemiş oldukları ücretler iade edilmez. Bu nedenle, dersler başladıktan sonra kaydınızı sildirirseniz, ücreti iade alamazsınız.	0,71
Ortalama				0,82

Böylece, LLM'in farklı tipte sorulara nasıl karşılık vereceği sınanmıştır. Sözü geçen 100 soru ile, bağlamı oluşturan yönetmeliğin her maddesi kapsanmıştır. Dolayısıyla soru sayısı yeterli görülmüştür.

Tüm sorular için, yanıtı içeren bağlam (sütun 3) ile LLM yanıtı (sütun 4) arasındaki benzerlik değerlerinin (sütun 5) ortalaması 0,82 çıkmıştır. Bu başarı çok yüksek görünmese de yanıtlar bir insan tarafından değerlendirdiğinde LLM'in tüm sorulara doğru yanıt verdiği anlaşılmaktadır. Son sorudaki gibi çok yüksek olmayan benzerlik oranının (0,71) nedeni, bağlamın sorulan sorudan daha çok bilgi içermesi, LLM'in bu

bağlamdan sadece sorunun yanıtını çıkarmasıdır. Dolayısıyla, bağlam ile yanıt benzerliğine bakıldığında oran çok yüksek çıkmamıştır; fakat sorunun yanıtı doğru olarak verilmiştir. Bu açıdan ortalama 0,82 benzerlik LLM performansı açısından başarılı kabul edilmelidir.

Ayrıca bağlamda olmayan bir soru sorulduğunda LLM'in yanlış bir yanıt vermediği de sınanmıştır. Örneğin, "üniversitenin en başarılı bölümü hangisi?" sorusuna "bu soruyu yanıtlamak için yeterli bilgim yok" şeklinde dönüş yapmıştır. Bu soruyla ilgili bir bilgi

yönetmelik maddelerinde bulunmadığı için bu doğru bir tutumdur.

Bu bölümdeki denemeler için de Python dilinde kod yazılmış ve LLM'e API yoluyla ulaşılmıştır.

3.4 EkoBot Arayüzü

Önerilen sistemin örnek kullanımı için, Şekil 2'deki gibi bir Web arayüzü tasarlanmıştır. Kullanıcı sorusunu metin olarak girdiğinde hem LLM'in yanıtını hem de bu yanıtı oluşturmak için yararlanılan yönetmelik maddelerini görebilmektedir.

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, bu prototipte bağlam olarak en benzer beş ($k = 5$) madde kullanılmıştır.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, kullanıcı her yanıt için, emojiyle ifade edilen, iyi, orta, kötü olmak üzere üç tip geribildirim verebilmektedir. Ayrıca, metin olarak yorumunu da yazabilmektedir. Bu arayüzde yanıtın yanı sıra yararlanılan kaynakların da gösterilmesi, kullanıcının bilgilendirilmesi açısından yararlı bulunmuştur.

Şekil 2. Örnek EkoBot Web arayüzü

IV. SONUÇ

Bu makale, Türkçe desteği olan sanal akademik danışman EkoBot'un geliştirilmesi ve sınanması üzerine kapsamlı bir çalışmayı sunmaktadır. Bu bot, RAG yöntemiyle çalışmakta, LLM olarak GPT-4o'yu kullanmaktadır.

RAG yönteminde "alma" ve "LLM tabanlı üretme" modülleri bulunmaktadır. İzmir Ekonomi Üniversitesi'nin "Ön Lisans ve Lisans Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği" belgesi içerisinden, sorulan soruya en yakın beş maddeyi seçme görevini "alma" modülü yerine getirmektedir ve bu seçimi yaparken gömülü vektörlerin kosinüs benzerliğinden yararlanmaktadır. Yönetmelik maddelerinin gömülü vektörlere dönüştürülmesi denemelerinde en iyi sonucu OpenAI "text-embedding-3-large" algoritması vermiştir.

İstem mühendisliği yöntemi kullanılarak, sorulan soru ve soruya en benzer beş yönetmelik maddesi LLM'e verilmiş ve yanıt alınmıştır. Bu işlem 100 soruluk bir veri kümesi üzerinden yapılmış ve LLM'in her soruya doğru yanıt verdiği gözlemlenmiştir. Yanıtlar ve yanıt

içeren yönetmelik maddeleri arasındaki ortalama kosinüs benzerliği 0,82 olarak hesaplanmıştır.

Önerilen sistem, bağlam belgelerinin artırılmasına ve kullanıcıdan gelecek geri bildirimlere göre yeni bağlam belgeleri eklenmesine uygundur. Bu işlem, LLM'in yeniden eğitilmesini gerektirmediğinden, yalnızca veri işleme aşamasından oluşacağından düşük maliyet ile yapılabilecektir. Bu uygulamanın ilk olarak test sürümü biçiminde öğrencilere açılması planlanmaktadır. Böylece, öğrencilerden gelecek sorulara göre veri kümesindeki eksiklikler belirlenecek ve gerekli yeni bağlam belgeleri sisteme eklenecektir.

OpenAI şirketinin sunduğu gibi, vektör gömme algoritmalarına ya da LLM'lere API üzerinden uzaktan erişim sayesinde, yerel bilgisayarda LLM çalıştırma, dolayısıyla da güçlü işlemci gücü gereksinimi ortadan kalkmakta, yalnızca İnternet bağlantısı gerekmektedir. Bu modellerin kullanım ücretleri ise makul sınırlar içerisindedir ve günden güne azalmaktadır.

Burada önerilen çözüm sayesinde öğrencilere zaman sınırı olmaksızın doğru bilgiler verilebilecek, süreç otomatikleştirilerek iyileştirilecek ve öğrenci

memnuniyeti arttırılacaktır. Bu açılardan, üniversite ortamı için Türkçe destekli akıllı sanal danışman botu yararlı bir uygulamadır.

Bundan sonrasında, vektör gömme işlemi için Google Embedding-001 vb. gibi başka algoritmalar, benzerlik hesapları için maksimum marjinal alaka (Maximal Marginal Relevance, MMR), Öklid uzaklığı vb. gibi başka yöntemler, LLM için Google Gemini vb. gibi başka büyük dil modelleri denenebilir. Bot arayüzü geliştirilirken sohbet akışı şeklinde hafıza eklenebilir. Yazılım kısmını kolaylaştırmak için LangChain, AgentGPT vb. gibi altyapı platformları kullanılabilir.

Öğrenci İşleri Müdürlüğü gibi üniversite idari birimlerinin verdiği geri beslemeye göre, sınav yönetmelikleri ve “sıkça sorulan sorular” gibi bilgiler, üniversite Web sayfalarında bulunmasına rağmen, öğrenciler ya bu sayfaların yerini bulamamakta, ya aradıkları bilginin hangi yönetmelikte olduğunu bilememekte, ya da sayfa içinde arama yaparken kullandıkları sözcükler metinlerde aynı biçimde yer almadığı için bilgiye erişememektedirler. Dolayısıyla öğrencilerin doğrudan ulaşabilecekleri ve sordukları soruları farklı ifadelerle de olsa anlayıp doğru bilgilere göre yanıtlayabilen bir RAG sistemi, var olan yaklaşımlara kıyasla daha kullanışlı ve verimlidir. Bu nedenle önerilen bu sistem, hem öğrencilere, hem akademisyenlere, hem de idari çalışanlara kolaylık sağlamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, OpenAI API Researcher Access Program tarafından API kredisi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Ayanouz, S., Abdelhakim, B. A., & Benhmed, M. (2020). A Smart Chatbot Architecture based NLP and Machine Learning for Health Care Assistance. *Proceedings of the 3rd International Conference on Networking, Information Systems & Security*, 1–6. <https://doi.org/10.1145/3386723.3387897>
- [2] Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., Petroni, F., Karpukhin, V., Goyal, N., Küttler, H., Lewis, M., Yih, W., Rocktäschel, T., Riedel, S., & Kiela, D. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS '20)*, 9459–9474.
- [3] Lee, K., Chang, M.-W., & Toutanova, K. (2019). Latent Retrieval for Weakly Supervised Open Domain Question Answering. *Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 6086–6096. <https://doi.org/10.18653/v1/P19-1612>
- [4] Guu, K., Lee, K., Tung, Z., Pasupat, P., & Chang, M.-W. (2020). Retrieval-Augmented Language Model Pre-Training. *Proceedings of Machine Learning Research*, 3929–3938.
- [5] Khattab, O., Santhanam, K., Li, X. L., Hall, D., Liang, P., Potts, C., & Zaharia, M. (2022). *Demonstrate-Search-Predict: Composing retrieval and language models for knowledge-intensive NLP*.
- [6] Ram, O., Levine, Y., Dalmedigos, I., Muhlga, D., Shashua, A., Leyton-Brown, K., & Shoham, Y. (2023). *In-Context Retrieval-Augmented Language Models*.
- [7] Shi, W., Min, S., Yasunaga, M., Seo, M., James, R., Lewis, M., Zettlemoyer, L., & Yih, W. (2023). *REPLUG: Retrieval-Augmented Black-Box Language Models*.
- [8] İEÜ Ön Lisans ve Lisans Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği. (2024). <https://www.ieu.edu.tr/tr/bylaws/type/read/id/72>.
- [9] Ranoliya, B. R., Raghuwanshi, N., & Singh, S. (2017). Chatbot for university related FAQs. *2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, 1525–1530. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2017.8126057>
- [10] Krassmann, A. L., Flach, J. M., Grand, A. R. C. da S., Tarouco, L. M. R., & Bercht, M. (2019). A Process for Extracting Knowledge Base for Chatbots from Text Corpora. *2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 322–329. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2019.8725064>
- [11] Nwankwo, W. (2018). Interactive Advising with Bots: Improving Academic Excellence in Educational Establishments. *American Journal of Operations Management and Information Systems*, 3(1), 6. <https://doi.org/10.11648/j.ajomis.20180301.12>
- [12] Chandra, Y. W., & Suyanto, S. (2019). Indonesian Chatbot of University Admission Using a Question Answering System Based on Sequence-to-Sequence Model. *Procedia Computer Science*, 157, 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.179>
- [13] Tommy, L., Kirana, C., & Riska, L. (2020). The Combination of Natural Language Processing and Entity Extraction for Academic Chatbot. *2020 8th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CITSM50537.2020.9268851>
- [14] Guvindan Raju, K. R., Adams, C., & Srinivas, R. (2018). Cognitive Virtual Admissions Counselor. *SMU Data Science Review*, 1(1), 1–13.
- [15] Gbenga, O., Okedigba, T., & Oluwatobi, H. (2020). An Improved Rapid Response Model for University Admission Enquiry System Using Chatbot. *International Journal of Computer (IJC)*, 38(1), 123–131.

- [16] Priadko, A. O., Osadcha, K. P., Kruhlyk, Vladyslav S., & Rakovych, V. A. (2019). Development of a chatbot for informing students of the schedule. *Proceedings of the 2nd Student Workshop on Computer Science & Software Engineering (CS&SE@SW 2019)*, 128–137.
- [17] Shivam, K., Saud, K., Sharma, M., Vashishth, S., & Patil, S. (2018). Chatbot for College Website. *International Journal of Computing and Technology*, 5(6), 74–77.
- [18] Mendoza, S., Hernández-León, M., Sánchez-Adame, L. M., Rodríguez, J., Decouchant, D., & Meneses-Viveros, A. (2020). Supporting Student-Teacher Interaction Through a Chatbot. In *Learning and Collaboration Technologies. Human and Technology Ecosystems* (pp. 93–107). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50506-6_8
- [19] Nguyen, T. T., Le, A. D., Hoang, H. T., & Nguyen, T. (2021). NEU-chatbot: Chatbot for admission of National Economics University. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 2, 100036. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100036>
- [20] Ula, M., Hardi, R., & Hipiny, I. (2023). An Improved Structure for Academic Information Services through AI Chatbots. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 16(5), 164–173. <https://doi.org/10.25103/jestr.165.20>
- [21] Verma, A., Kuntala, C., Khatri, P., S., Kaur, S., Mohapatra, A. K., & Singhal, S. (2022). University Chatbot System Using NLP. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4255753>
- [22] Oliveira, P. F., & Matos, P. (2023). Introducing a Chatbot to the Web Portal of a Higher Education Institution to Enhance Student Interaction. *ASEC 2023*, 128. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-16621>
- [23] Maryamah, M., Irfani, M. M., Tri Raharjo, E. B., Rahmi, N. A., Ghani, M., & Raharjana, I. K. (2024). Chatbots in Academia: A Retrieval-Augmented Generation Approach for Improved Efficient Information Access. *2024 16th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, 259–264. <https://doi.org/10.1109/KST61284.2024.10499652>
- [24] Neupane, S., Hossain, E., Keith, J., Tripathi, H., Ghiasi, F., Golilarz, N. A., Amirlatifi, A., Mittal, S., & Rahimi, S. (2024). From Questions to Insightful Answers: Building an Informed Chatbot for University Resources. *ArXiv*.
- [25] Nguyen, H. D., Tran, T.-V., Pham, X.-T., Huynh, A. T., & Do, N. V. (2021). Ontology-based Integration of Knowledge Base for Building an Intelligent Searching Chatbot. *Sensors and Materials*, 33(9), 3101. <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3264>
- [26] Ait Baha, T., El Hajji, M., Es-Saady, Y., & Fadili, H. (2024). The impact of educational chatbot on student learning experience. *Education and Information Technologies*, 29(8), 10153–10176. <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12166-w>
- [27] Aloqayli, A., & Abdelhafez, H. (2023). Intelligent Chatbot for Admission in Higher Education. *International Journal of Information and Education Technology*, 13(9), 1348–1357. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2023.13.9.1937>
- [28] Alharethi, T. M. (2023). Autoresponder using Chatbot for Educational Services. *2023 1st International Conference on Advanced Innovations in Smart Cities (ICAISC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICAISC56366.2023.10084956>
- [29] Lee, Y.-F., Hwang, G.-J., & Chen, P.-Y. (2022). Impacts of an AI-based chabot on college students' after-class review, academic performance, self-efficacy, learning attitude, and motivation. *Educational Technology Research and Development*, 70(5), 1843–1865. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10142-8>
- [30] Martinez-Araneda, C., Gutiérrez, M., Maldonado, D., Gómez, P., Segura, A., & Vidal-Castro, C. (2024). Designing a chatbot to support problem-solving in a programming course. 966–975. <https://doi.org/10.21125/inted.2024.0317>
- [31] Es, S., James, J., Espinosa-Anke, L., & Schockaert, S. (2023). RAGAS: Automated Evaluation of Retrieval Augmented Generation. *ArXiv*.
- [32] Lin, C.-Y. (2004). ROUGE: A Package for Automatic Evaluation of Summaries. *Text Summarization Branches Out*, 74–81.
- [33] Papineni, K., Roukos, S., Ward, T., & Zhu, W.-J. (2001). BLEU. *Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics - ACL '02*, 311. <https://doi.org/10.3115/1073083.1073135>
- [34] Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., Weinberger, K. Q., & Artzi, Y. (2020, April 26). BERTScore: Evaluating Text Generation with BERT. *8th International Conference on Learning Representations*.

Düşük Maliyetli GNSS ve IMU Verilerinin Entegrasyonu: Uygulama Örneği

Integration of Low-Cost GNSS and IMU Data: A Case Study

Ramazan Alper KUÇAK ¹, Aysan Şahin ¹

¹*İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), İnşaat Fakültesi, 34469 Maslak İstanbul, TÜRKİYE*

Öz

Günümüz teknolojik gelişmeleri, konum belirleme sistemlerinin mühendislik uygulamaları ve disiplinler arası alanlardaki kritik rolünü vurgulamaktadır. Light Detection and Ranging (LiDAR), Inertial Measurement Unit (IMU) ve Global Navigation Satellite System (GNSS) tabanlı sistemler, geomatik mühendisliği, akıllı şehir uygulamaları, insansız hava araçları, otonom araçlar ve robotik sistemler gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, yüksek hassasiyet gereksinimleri ve bütçe kısıtları, düşük maliyetli sistemlerin yeterli doğrulukla veri sağlayamaması nedeniyle kullanımını zorlaştırmaktadır. Bu bağlamda, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, maliyet etkin bir çözüm sunarken doğruluğun artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışma, iPhone 13 Pro cihazından elde edilen GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu ile İstanbul'un Bebek semtinde yaklaşık 330 metrelik bir yürüyüş rotası boyunca bir yol haritası oluşturulmasını incelemiştir. MATLAB ortamında gerçekleştirilen analizde, önce Butterworth ve Kalman filtreleme teknikleri uygulanarak veriler işlenmiş, GNSS verilerine %95, IMU verilerine %5 ağırlık verilerek sapmalar minimize edilmiştir. Kalman filtresinin parametreleri optimize edilerek daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, GNSS ağırlığı %98'e çıkarılıp IMU ağırlığı %2'ye düşürülerek farklı bir senaryo uygulanmış, böylece entegre verilerin doğruluğu artırılmıştır. Bu süreçte, GNSS verilerinin yüksek hassasiyeti ile IMU'nun sinyal kaybı durumlarındaki katkısı optimize edilmiştir. Çalışma, düşük maliyetli cihazlardan elde edilen GNSS ve IMU verilerinin uygun algoritmalarla işlenmesiyle yüksek doğrulukta konum belirleme sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır. Bu yöntem, düşük bütçeli projeler için maliyet etkin çözümler sunarak mühendislik projelerine önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, IMU, Butterworth Filtresi, Kalman Filtresi, iPhone 13 Pro, Düşük Maliyetli Sistemler

Abstract

Today's technological advancements highlight the critical role of positioning systems in engineering applications and interdisciplinary fields. Light Detection and Ranging (LiDAR), Inertial Measurement Unit (IMU), and Global Navigation Satellite System (GNSS)-based systems are widely used in areas such as geomatics engineering, smart city applications, unmanned aerial vehicles, autonomous vehicles, and robotic systems. However, high accuracy requirements and budget constraints make the use of low-cost systems challenging. In this context, the integration of GNSS and IMU data provides a cost-effective solution while contributing to the improvement of positioning accuracy. This study examines the creation of a route map using the integration of GNSS and IMU data obtained from an iPhone 13 Pro device during a walking route of approximately 330 meters in Istanbul's Bebek district. In the MATLAB environment, data were first processed using Butterworth and Kalman filtering techniques, with weights assigned as 95% to GNSS data and 5% to IMU data, minimizing deviations. The parameters of the Kalman filter were optimized to achieve more accurate results. Subsequently, a different scenario was applied by increasing the GNSS weight to 98% and decreasing the IMU weight to 2%, thereby enhancing the accuracy of the integrated data. This process optimized the high accuracy of GNSS data and the contribution of IMU data during signal loss situations. The study demonstrates that high-accuracy positioning can be achieved by processing GNSS and IMU data obtained from low-cost devices with appropriate algorithms. Moreover, this study contributes to the literature by being the first to combine GNSS and IMU data obtained from the iPhone 13 Pro. Additionally, it introduces innovations by integrating the two datasets without any external antenna or post-processing applied to enhance the accuracy of the iPhone 13 Pro GNSS data. This method offers cost-effective solutions for low-budget projects, providing significant contributions to engineering applications.

Keywords: GNSS, IMU, Butterworth Filter, Kalman Filter, iPhone 13 Pro, Low-Cost Systems

I. GİRİŞ

Günümüz teknolojik gelişmeleri, konum belirleme teknolojilerinin mühendislik uygulamalarındaki vazgeçilmez rolünü giderek daha belirgin hale getirmektedir. Geomatik mühendisliği başta olmak üzere, akıllı şehir planlaması, yol haritalarının oluşturulması, insansız hava araçlarıyla gerçekleştirilen veri toplama işlemleri, Light Detection and Ranging (LiDAR) teknolojisi, otonom araç sistemleri ve robotik uygulamalar gibi geniş bir alanda Global Navigation Satellite System (GNSS) ve Inertial Measurement Unit (IMU) tabanlı sistemler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu teknolojiler, hassas konum belirleme ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilen yenilikçi yaklaşımların temelini oluşturmakta ve disiplinler arası uygulamalarda kritik bir öneme sahiptir.

GNSS teknolojisinin temelleri 1957 yılında atılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı, 1978 yılında Global Positioning System (GPS) için ilk test uydusunu fırlatmış ve bu sistemin tam anlamıyla operasyonel hale gelmesi 1995 yılında mümkün olmuştur. 1980'li yılların ortasında, GPS alıcılarının ölçüm işlemlerinde kullanımı Orman Hizmetleri tarafından başlatılmıştır. Ancak bu dönemde kullanılan GPS cihazları oldukça pahalı, büyük ve ağır olmasının yanı sıra, yüksek enerji tüketimi nedeniyle ciddi miktarda pil gücüne ihtiyaç duymaktaydı [1].

GPS ve dahili haritalara sahip ilk ticari cep telefonu 1999 yılında tanıtılmıştır [2]. 2007'den itibaren akıllı telefonlarda GPS teknolojisinin kullanımı hızla artmış ve 2009 yılına kadar standart hale gelmiştir [3, 4]. Düşük maliyetli GNSS çipleri metre düzeyinde doğruluk sağlarken, pahalı ekipmanlar çoklu frekans sinyalleriyle santimetre hassasiyetine ulaşabilmektedir. Teknolojik gelişmeler, GNSS alıcıları ve antenlerin performansını artırmış, pil ömrünün uzamasıyla birlikte akıllı telefonlarda daha fazla uygulama imkânı sağlamıştır. Akıllı telefonlar, yüksek kaliteli jeodezik cihazların doğruluğunu tam olarak karşılayamasa da, alınan sinyallerdeki çoklu yol hatalarını düzeltebilen yazılımlarla desteklendiğinde performansları bu cihazlara oldukça yaklaşmaktadır [5].

Akıllı telefonların GPS/GNSS doğruluğu, veri toplama sırasında sinyalleri etkileyen çevresel faktörler, uydu konumları, donanım özellikleri ve yazılım değişkenlerine bağlı olarak değişmektedir. Bununla birlikte, akıllı telefonlar, düşük maliyetli bir alternatif olarak konumlandırmada gelişmiş doğruluk sağlayabilme potansiyeline sahiptir [6, 7, 8].

IMU'nun tarihi, 1930'larda uçak navigasyonunda ve büyük cihazlarda kullanılmaya başlanmasıyla ortaya çıkmıştır [9]. Ancak, o dönemde boyut, maliyet ve güç tüketimi gibi kısıtlamalar nedeniyle bu teknoloji yalnızca büyük ölçekli uygulamalarda sınırlı kalmıştır. Son yıllarda, düşük maliyetli, kompakt ve düşük işlem

gücü gerektiren mikro-elektromekanik sistem (Micro-Electro-Mechanical System - MEMS) IMU'ların geliştirilmesiyle birlikte, bu cihazların kullanım alanları önemli ölçüde genişlemiş ve talep hızla artmıştır [10]. Küçük elektronik cihazların taşınmasının yaygınlaşması, pozisyon sensörlerine olan talebi önemli ölçüde artırmıştır. Bu sensörler, canlı konum belirleme ve üçüncü taraflara güncelleme sağlama gibi gereksinimlere yanıt vermektedir. IMU'lar, hızlanma, açısal hız ve dönme hareketlerini ölçme yetenekleriyle geniş bir uygulama alanı sunmaktadır [11, 12].

GNSS sistemleri, yol navigasyonu gibi zorlu gereksinimlerin karşılanmasında öne çıkan bir teknoloji olarak kabul edilmektedir. Ancak, GNSS sinyalleri, kentsel kanyonlar, kapalı otoparklar ve yeraltı beton tüneller gibi sinyal alımının zor olduğu bölgelerde zayıflama, yansıma veya engellenme gibi sorunlarla karşılaşabilmektedir [13]. Bu tür sorunları azaltmak amacıyla, yardımcı teknolojilerin kullanımı bağımsız GNSS çözümlerinin sınırlamalarını gidererek erişilebilirlik ve doğruluk düzeylerini artırmaktadır. Özellikle GNSS ve IMU sensörlerinden elde edilen ölçümlerin birleştirilmesiyle, yüksek bant genişliğine sahip bir navigasyon çözümü sunmak için ticari entegrasyon teknikleri kullanılmaktadır. Bu entegrasyon sayesinde, IMU sensörlerinin kalibrasyonu sağlanmakta, ataletsel navigasyon sistemlerindeki hata büyümesi kontrol altına alınmakta ve bağımsız GNSS çözümlerine kıyasla daha yüksek doğrulukta veri çıktısı elde edilmektedir [14,15,16,17].

Konum bazlı sistemler, mobil cihazlarla elde edilen verilerin coğrafi bilgi sistemlerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır. GNSS ve IMU verileri, hem açık alanlarda konum bilgisi elde etmekte hem de GNSS sinyal kaybı durumlarında hassas konum belirleme çalışmaları için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Ancak, hassasiyet gereksinimleri ve maliyet kısıtlamaları, özellikle düşük bütçeli projelerde önemli bir engel oluşturmaktadır. Bu noktada, düşük maliyetli GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, konum doğruluğunu artırarak bu tür projelerde kullanımını mümkün kılmaktadır ve aynı zamanda birçok çalışmada altlık veri olarak değerlendirilebilmektedir. Literatürde, GNSS ve IMU verilerinin birleştirildiği birçok uygulama vardır. Fakat bunlar GNSS verilerinin post-process işlemi veya farklı bir anten tipi ile sinyal gücü artırılarak doğruluğu artırılmış verileri direkt olarak kullanıldığı çalışmalardır. Örneğin, iPhone 13 Pro GNSS verisinin doğruluğunu, viDoc RTK GNSS ile artırmıştır [18]. Buna benzer birçok çalışma için örnek verilebilir. Ancak, bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır.

Bu çalışma, Bebek bölgesinde gerçekleştirilen bir yürüyüş esnasında iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin kaydedilmesi, bu verilerin MATLAB ortamında kalman filtrelemesi ile işlenmesi ve entegre edilmesi yoluyla yol haritaları oluşturmayı amaçlamaktadır. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payı azaltılmakta ve daha hassas bir konum belirleme sağlanmaktadır. Bu durum hem teorik hem de pratik uygulamalar için önemli katkılar sunmanın yanı sıra; düşük maliyetli sensörlerden elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi ile konum doğruluğunun artırılması uygulamalarına önemli katkılar sunmaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. GNSS ve IMU Sistemleri

GNSS tabanlı konumlandırma, pek çok navigasyon uygulamasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. GNSS alıcıları, uydulardan alınan mesafe ölçümleri ile güvenilir bir üç boyutlu konumlandırma çözümü sunabilmektedir. Ancak, GNSS tabanlı konumlandırma, özellikle araçların şehir kanyonlarında [19], tünel içinde hareket ettikleri durumlarda ya da GNSS sinyalinin sahte sinyal üretimi [20] veya sinyal engelleme (jamming) saldırılarıyla karşılaştığı hallerde kullanılamaz hale gelebilir. Bunun yanı sıra, GNSS mesafe ölçümlerinin kalitesi, çoklu yol etkisi veya iyonosferik aktivite [21] gibi dış etkenlerle de olumsuz bir şekilde etkilenebilir. Buna karşılık, İvmeölçer Birimi (IMU) ölçümleri, dış çevresel faktörlerden daha az etkilenebilir. Bu nedenle, IMU ve GNSS alıcısının entegre edildiği navigasyon sistemleri, genellikle sürekli, güvenilir ve yüksek bant genişliğine sahip bir navigasyon çözümü sağlamak için tercih edilmektedir [22].

İki temel GNSS sistemi NAVSTAR GPS ve GLONASS'dir. En kötü şartlarda, Global Positioning System (GPS) için rapor edilen doğruluk yaklaşık 7,5 metre iken Rusya'ya ait konumlandırma sistemi olan GLONASS için bu durum 10 metre olarak rapor edilmiştir. Tabi bu durum alıcı antenin tipine, hava şartlarına, GNSS' in bulunduğu konuma göre değişiklikler gösterebilir. Üreticiler genellikle düşük maliyetli alıcılar kullanma eğilimindedir, çünkü hassasiyet eksikliği, harita eşleme teknikleri veya daha kesin bir konum elde etmek için ağ verileri kullanılarak hassas hale getirilebilir. Ancak, bu teknikler, kullanıcı post-processing çözümünü veya uzak bölgelerde olduğu gibi ağ bağlantısının mümkün olmadığı koşullarda etkili olmayabilir. GNSS alıcısı ve IMU aracılığıyla elde edilen ham konum verilerine (enlem ve boylam) dayanarak, pahalı GNSS alıcılarına bir sayısal alternatif oluşturabilmek için, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, Butterworth filtresi ve Kalman filtresi gibi filtreleme yöntemleriyle

iyileştirilebilmektedir. Butterworth filtresi, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılırken, Kalman filtresi, verilerin doğruluğunu artırmak için IMU ve GNSS verilerini birleştirerek daha hassas konum tahminleri elde edilmesini sağlayabilmektedir. Bu filtreleme yöntemleri sayesinde, GNSS ve IMU entegrasyonu daha güvenilir ve doğru bir hale getirilmiştir [23].

2.2. Butterworth Filtresi ile Ön İşleme

Butterworth filtresi, geçiş bandında mümkün olduğunca düz bir frekans yanıtı sağlayacak şekilde tasarlanmış bir sinyal işleme filtresi türüdür. Bu filtre, ilk kez 1930 yılında Britanyalı mühendis ve fizikçi Stephen Butterworth tarafından "On the Theory of Filter Amplifiers" başlıklı makalesinde tanımlanmıştır [24]. Butterworth filtreleri, hareket analizi ve benzeri uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dijital filtrelerden biridir. Hızlı ve basit yapısıyla, birçok uygulama için yeterli performans sağlamak ve bu da Butterworth filtresinin radyo frekansı (RF) ve sesli aktif filtreler gibi elektronik alanlarda geniş bir kullanım alanı bulmasına olanak tanımaktadır. Ayrıca, frekansa dayalı olmaları nedeniyle filtrelemenin etkisi kolayca anlaşılabilir ve tahmin edilebilir [25,26].

2.3. Kalman Filtresi ile Veri Entegrasyonu

Kalman filtreleme tekniği, 1960 yılında Rudolf Emil Kalman tarafından geliştirilen ve günümüzde de mühendislik ve istatistik gibi birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahip bir yöntemdir. Bu yöntem, doğrusal bir sistemdeki gürültülü ve normal dağılım gösteren veriler üzerinden en iyi kestirimi sağlar ve bu kestirimleri gerçek zamanlı olarak gerçekleştirebilir [27]. Kalman filtresi, özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda diğer tahmin yöntemlerine kıyasla üstün performans göstermesiyle dikkat çeker [28].

Kalman filtresinin temel matematiksel yapısı, sistemin dinamiğini ve ölçüm sürecini tanımlayan iki ana bileşene ayrılmaktadır [29]. Sürekli zamanlı Kalman filtresinde, sistem dinamiği, n. dereceden doğrusal diferansiyel denklemlerle ifade edilir [30];

$$\dot{x} = Fx + w = \frac{\partial^n x}{\partial t^n} \quad (1)$$

Bu diferansiyel eşitlik bir $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ Aralığı için tanımlandığında, kesikli Kalman Filtresi için dinamik model;

$$x_k = Ax_k - 1 + w_k \quad (2)$$

Ölçme modeli ise,

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (3)$$

Eşitliği ile ifade edilmektedir [27][30]. Burada geçen terimler ise;

$\hat{x}$: Sürekli Kalman Filtresinde durum vektörü

F: Sürekli Kalman Filtresinde diferansiyel denklemin katsayılar matrisi

x_k : Kesikli Kalman Filtresindeki t_k anındaki durum vektörü

x_{k-1} : Kesikli Kalman Filtresindeki t_{k-1} anındaki durum vektörü

A : Kesikli Kalman Filtresindeki t_{k-1} anından t_k anına geçiş matrisi

w_k : Dinamik modele ait gürültü vektörü

z_k : t_k anındaki ölçü vektörü

H : Ölçme modeline ait tasarım matrisi

v_k : Ölçülere ait gürültü vektörü

Temsil etmektedir.

Filtreleme aşaması, en küçük kareler yöntemiyle gerçekleştirilen dengeleme işlemiyle benzerlik gösterir. Ancak, klasik dengeleme yöntemlerinden en önemli farkı, yalnızca ölçüm modelinin değil, aynı zamanda bir dinamik modelin de tanımlanarak çözümün adım adım ilerlemesidir. Filtreleme, ölçüm verileri ve önceden yapılmış kestirim bilgilerini ağırlıklı bir şekilde birleştirerek, bilinmeyen durumların filtrelenmiş değerlerini hesaplar. Filtreleme denklemleri, dinamik ve ölçüm modellerinin fonksiyonel ve stokastik özelliklerini birleştirerek çözüm sürecini gerçekleştirir [29, 30].

Sonuç olarak Kalman filtre eşitlikleri sade şekli ile;

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- (I - K_k H)^T + K_k R K_k^T \quad (5)$$

Şeklinde ifade edilmektedir [26, 29].

Bu ifadede yer alan K_k , Kalman Kazancı olarak adlandırılmaktadır.

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (6)$$

Eşitliği ile gösterilmektedir ve kovaryans matrisinin (P_k) de sade olarak gösterimi;

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (7)$$

Şeklinde olmaktadır.

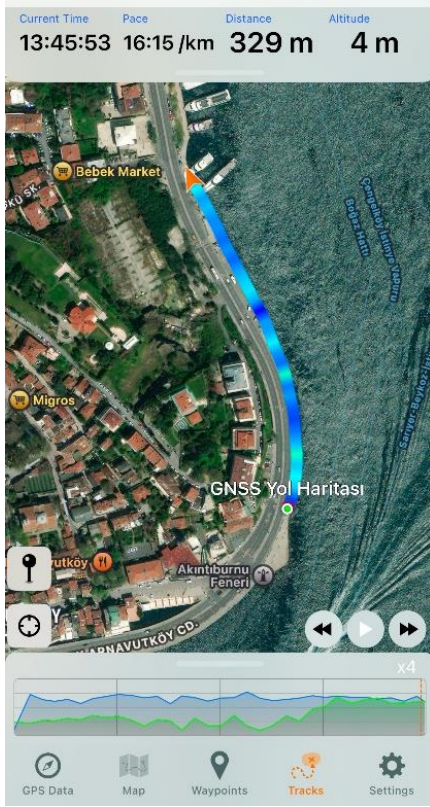
Kalman kazanç matrisi, ölçüm ve öncül kestirim arasındaki hatanın oranını belirler ve 0 ile 1 arasında bir değeri ifade eder. Kalman kazancının hesaplanmasında, dinamik durum ve ölçüm değerlerine ait rastgele hataların normal dağılım gösteren varyans-kovaryans matrisleri olan Q ve R matrisleri önemli bir rol oynar. Bu matrisler, kazanç değerinin doğru belirlenmesinde kritik bir etkiye sahiptir.

2.4. Filtre Parametrelerinin Optimizasyonu

Bu çalışma, seçilen bir pilot bölgede gerçekleştirilen bir yürüyüş esnasında düşük maliyetli (iPhone 13 Pro) GNSS ve IMU verilerinin Kalma filtrelemesi ile entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payının azaltılması ve daha hassas bir konum belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, çünkü sistemde halihazırda bulunan GNSS ve IMU sensörleri sayesinde bu yöntemlerin uygulanması yalnızca telefon için üretilen basit yazılımlar ile mümkün olabilmektedir. Bu uygulama, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefondan alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, bu uygulama iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin birbirine entegrasyonu açısından da literatürde yapılan ilk çalışma olma özelliğinin yanında, başka alan ya da cihazlarda kullanılan düşük maliyetli GNSS ve IMU veri entegrasyonu çalışmalarına çeşitli yenilikler getirmektedir.

III. UYGULAMA

Çalışma alanı olarak, Bebek bölgesinde yaklaşık 330 metrelik bir yürüyüş esnasında GNSS ve IMU verileri kaydedilmiştir. GNSS verileri GPS Tracks uygulaması ile toplanmıştır (Şekil 1). Enlem-boylam bilgileri MATLAB'de çizilerek bir yol haritası oluşturulmuştur GNSS yol haritasını göstermektedir (Şekil 2).



Şekil 1. GPS Tracks Uygulaması ile GNSS Verilerinin Toplanması



Şekil 2. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası

Bu çalışmada GNSS verileri GPS Tracks uygulaması ile toplanmış, IMU verileri ise SensorLog uygulaması ile kaydedilmiştir. GNSS verileri; enlem, boylam ve irtifa bilgilerini içermekte, IMU verileri ise ivme (X, Y, Z eksenlerinde) ve açısal hız ölçümlerini kapsamaktadır.

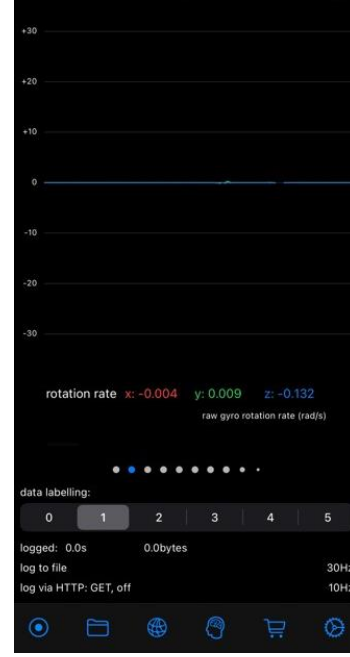
MATLAB ortamında şu adımlar izlenmiştir:

1. GNSS verilerinin yüklenmesi: GNSS verileri, CSV formatında yüklenir ve enlem, boylam, yükseklik ve zaman bilgileri alındı.
2. IMU verilerinin yüklenmesi: IMU verileri, CSV formatında yüklenir, zaman damgaları normalize edildi ve ivme verileri SI birimlerine dönüştürüldü.
3. Veri temizleme: GNSS ve IMU verilerindeki tekrar eden zaman damgaları temizlendi, veri setindeki yinelenen değerler kaldırıldı.
4. Veri filtresi: IMU verileri, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla düşük frekans bileşenlerini koruyacak şekilde filtrelendi.
5. Zaman senkronizasyonu: GNSS ve IMU zaman damgaları ortak bir zaman aralığına senkronize edildi ve veriler interpolasyon ile hizalandı.
6. Hız ve konum hesaplama: İvme verilerinin integralini alarak hız ve konum hesaplamaları yapıldı, ivme verilerinden hız ve konum hesaplandı.
7. GNSS verilerinin dönüştürülmesi: GNSS enlem ve boylam değerleri World Geodetic System 1984 (WGS 84) koordinat sisteminde olduğu için, sağa, yukarı ve yükseklik cinsinden metre cinsine dönüştürüldü.
8. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu: GNSS ve IMU verileri, ağırlıklı olarak birleştirildi, GNSS verilerine daha fazla ağırlık verildi.
9. Kalman filtresi ve Butterworth filtreleri uygulandı.
10. Yol haritası çizimi: GNSS + IMU Entegre yol haritası çizildi ve uydu haritası arka planı olarak ayarlandı.
11. Kalman filtresi parametrelerinin ayarlanması: Kalman filtresi optimizasyonu yapıldı, parametreler (süreç gürültüsü kovaryansı, ölçüm gürültüsü kovaryansı, başlangıç hatası) daha doğru tahminler için ayarlandı.
12. Ağırlık değişiklikleri: GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda, GNSS ağırlığı artırıldı, IMU ağırlığı azaltıldı; GNSS ağırlığı %95'ten %98'e çıkarıldı, IMU ağırlığı ise %5'ten %2'ye düşürüldü. (Bu adımda, Kalman filtresi ilk uygulandığı haliyle kullanılır ve optimizasyon yapılmaz, böylece sadece ağırlıklara bağlı entegre yol haritası değişimi gözlemlenir.)

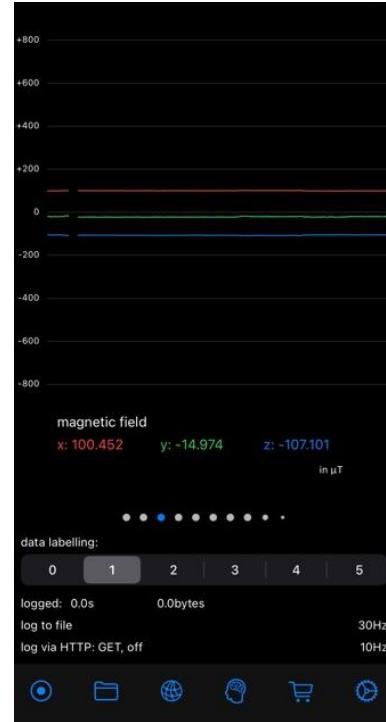
GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu, Butterworth filtresi ve Kalman filtresi gibi filtreleme yöntemleriyle iyileştirilmiştir. Butterworth filtresi, yüksek frekanslı gürültüyü azaltmak amacıyla kullanılırken, Kalman filtresi, verilerin doğruluğunu artırmak için IMU ve GNSS verilerini birleştirerek daha hassas konum tahminleri elde edilmesini sağlamıştır. Bu filtreleme yöntemleri sayesinde, GNSS ve IMU entegrasyonu daha güvenilir ve doğru bir hale getirilmiştir [23]. IMU verileri ise SensorLog uygulamasında toplanmıştır. Ham ivmeölçer verileri toplanmıştır (Şekil 3). Ham jiroskop verileri toplanmıştır (Şekil 4). Ham manyetometre verileri toplanmıştır (Şekil 5).



Şekil 3. SensorLog Uygulamasında Ham İvmeölçer Verilerinin Toplanması



Şekil 4. SensorLog Uygulamasında Ham Jiroskop Verilerinin Toplanması



Şekil 5. SensorLog Uygulamasında Ham Manyetometre Verilerinin Toplanması

Bu veriler, MATLAB ortamında analiz edilmiştir. IMU verilerinden hız ve konum hesaplamaları yapılmış, GNSS ile entegrasyon için zamansal senkronizasyon ve ağırlıklandırma uygulanmıştır. Bu süreçte GNSS verilerine %95, IMU verilerine %5 ağırlık verilerek entegre bir harita oluşturulmuştur (Şekil 6). Son olarak, GNSS yol haritası ve entegre yol haritası karşılaştırılarak aralarındaki farklar incelenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. GNSS (%95 Ağırlıklı) ve IMU (%5 Ağırlıklı) Verilerinin Entegrasyonu ile Oluşan Entegre Yol Haritası

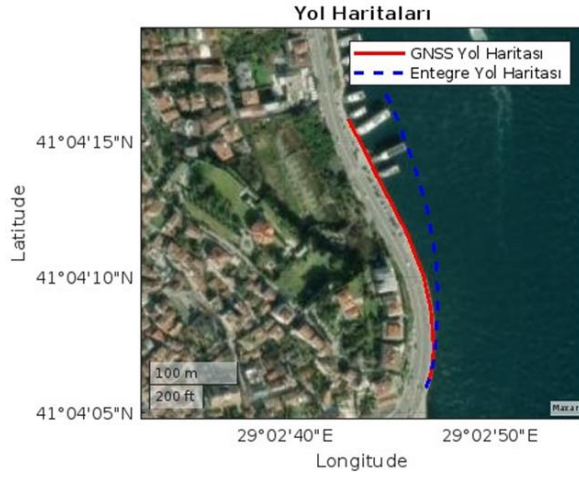
Şekil 6'da görüleceği üzere, IMU verilerinin başlangıçta yürüyüş yolu boyunca yaklaşık 50 m doğru gitmesine rağmen, 50 metreden sonra IMU verisi normal konumdan çok fazla sapma ile konum doğruluğunun bozulduğu görülmüştür. Şekil 7 'de ise GNSS ile IMU verilerinin yaklaşık 50 metreden sonraki farkı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7. GNSS Yol Haritası ve GNSS (%95 Ağırlıklı) ve IMU (%5 Ağırlıklı) Verilerinin Entegrasyonu ile Oluşan Entegre Yol Haritası

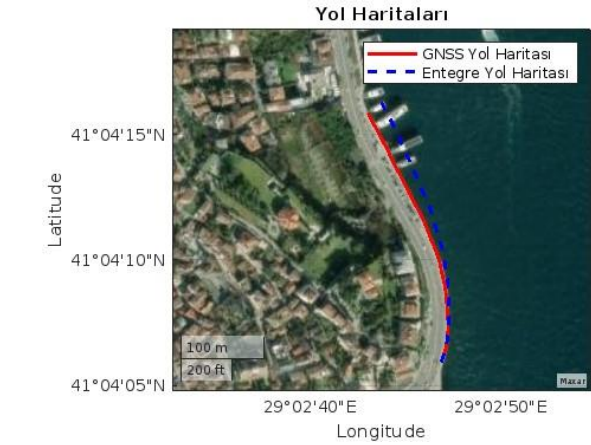
GNSS ve IMU verileri tek başına yukarıdaki literatürde de bahsedildiği gibi herhangi bir algoritma kullanılmadan ve optimizasyon yapılmadan yeterli doğruluk ile kullanılamamaktadır. GNSS verileri uydular ile konum belirlemesi yaptığı için IMU verilerine göre belirli bir standartta konum doğruluğu üretebilir. Bu yüzden genellikle, GNSS 'in sinyal kesikliği yaşadığı durumlarda ya da herhangi bir sebepten veri alamadığı durumlarda, IMU verileri ile bir müddet konum doğruluğu sağlanabilir. Bu uygulama da, bu sebeple GNSS verilerine daha fazla güvenildiği için yüzde 95 ağırlık GNSS verilerine verilmiştir. Şekil 7'de herhangi bir optimizasyon yapmadan sadece normal kalman filtrelemesi ile elde edilen GNSS ve IMU verileri gösterilmektedir.

Daha sonra, Kalman filtresi ve butterworth filtresi uygulanarak GNSS ve IMU verileri optimize edilmiştir. Optimizasyon sırasında, süreç gürültüsü kovaryansı ve ölçüm gürültüsü kovaryansı değerleri dikkatlice ayarlanmıştır. Süreç gürültüsü kovaryansı, IMU verilerindeki gürültünün etkisini azaltmak için artırılmış, ölçüm gürültüsü kovaryansı ise GNSS verilerine daha fazla güven sağlamak amacıyla azaltılmıştır. Ayrıca başlangıç hata kovaryansı (P) değeri daha düşük bir seviyeye indirilerek filtreleme daha hassas hale getirilmiştir. Bu süreçte elde edilen GNSS yol haritası ve Kalman filtresinin optimizasyonu sonucu oluşan entegre yol haritası gösterilmiştir (Şekil 8). Şekil 7 ve 8 'in temel farkı, Kalman filtresinin parametrelerinin optimize edilmesidir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, IMU verilerinin doğru rotaya daha fazla yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu çıkarım, Kalman filtresi uygulanmadan önceki GNSS ve IMU entegrasyon sonuçlarıyla karşılaştırıldığında, filtre parametrelerinin optimize edilmesi sonucunda IMU verilerinin GNSS referans rotasına olan ortalama konumsal sapmasının azaldığı tespit edilerek yapılmıştır. Özellikle yürüyüş rotasının başlangıç bölgesinde (0-50 metre), IMU verilerinin Kalman filtrelemesi sonrasında GNSS verilerine daha yakın seyrettiği, harita üzerinde IMU kaynaklı sapmaların önceki entegre yol haritasına kıyasla yaklaşık 10 metre azaldığı analiz edilmiştir. Bu durum, bu IMU verilerindeki süreç gürültüsünün azaltılması ve GNSS verilerine daha yüksek güven tanımlanması sonucu elde edilmiştir. Görsel olarak ise, Şekil 8'deki entegre yol haritası, GNSS yol haritası ile daha fazla çakışma göstermekte ve IMU verilerinin rotadan sapma miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle, iyileştirilen Kalman filtresi parametreleri ile IMU verilerinin GNSS doğruluğuna daha fazla yaklaştığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 8. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası ve Kalman Filtresinin Optimizasyonu Sonucunda Oluşan Entegre (%95 Ağırlıklı GNSS + %5 Ağırlıklı IMU Verileri) Yol Haritası

Bu süreçte, GNSS verilerinin zaman serisi ile IMU verileri zamansal olarak senkronize edilmiştir. Senkronizasyonun ardından GNSS enlem boylam verileri sağa yukarı değerlerine dönüştürülerek IMU verileri ile uyumlu hale getirilmiş ve Kalman filtresi ile her adımda konum tahmini yapılarak hata payı minimize edilmiştir. Filtreleme sonucunda, entegre yol haritasının GNSS yol haritasına daha yakın bir görünüm sunduğu gözlemlenmiştir. GNSS ve IMU verileri optimize edilmiş ve bu sayede sapmalar azaltılmıştır. Bu aşamada, ağırlıklandırma sürecinde GNSS verilerine daha fazla güvenilerek entegrasyonun hassasiyeti artırılmıştır. GNSS verilerinin ağırlığını %98'e çıkarılmış, IMU verilerinin ağırlığını %2'ye düşürülmüştür. Bu sayede, entegre haritanın GNSS yol haritasına daha yakın bir hassasiyet ile yaklaşması sağlanmıştır. Bu değişiklikler sonucu oluşan GNSS yol haritası ve ağırlık optimizasyonu sonucu elde edilen entegre yol haritası gösterilmiştir (Şekil 9). Şekil 8'in Şekil 9'dan temel farkı, kalman filtresi parametrelerinin optimize edilmesidir. Şekil 9'da görüldüğü üzere, IMU verilerinin doğru rotaya daha fazla yaklaştığı ve ilk başlangıçtaki 50 metre IMU verilerinin yaklaşık 70 metre kadar doğruluğunun daha arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 9. GNSS Verileri ile Oluşturulan Yol Haritası ve GNSS ve IMU Verilerinin Ağırlıklarının Değiştirilmesi ile Oluşan Entegre (%98 Ağırlıklı GNSS + %2 Ağırlıklı IMU Verileri) Yol Haritası

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi sonucunda elde edilen haritalar, yürüyüş rotasının genel hatlarını doğru bir şekilde yansıtmıştır. GNSS verileri, yüksek doğruluğu ile yürüyüş rotasını belirlemede etkili olmuş, ancak IMU verilerinin katkısı GNSS sinyal kaybı yaşanan durumlarda tamamlayıcı bir rol üstlenmiştir. Bununla birlikte, IMU sensörlerinin hataları zamanla birikerek entegre haritada doğru yönünde sapmalara neden olmuştur. Bunun sebebi, iPhone 13 Pro IMU sensörünün hassasiyetinin düşüklüğü ya da kullanılan Sensorlog yazılımının verileri hassas bir şekilde elde edilememesi de olabilir. Düşük maliyetli sensörler de genelde bu hassasiyet sorunlarının yaşanması normal bir durumdur. Özellikle cep telefonu gibi akıllı cihazlara yerleştirilen IMU sensörleri düşük hassasiyete sahip olduğu için bu durum konum verisinin doğru elde edilebilmesi açısından büyük önem arz etmektedir.

Bu uygulamada da daha önce de bahsedildiği gibi, (iPhone 13 Pro) GNSS ve IMU verilerinin Kalman filtrelemesi ile entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payının azaltılması ve daha hassas bir konum belirlenmesi amaçlanmıştır ve yapılan çalışmada GNSS + IMU verilerinin farklı sistemlere sahip olması nedeniyle entegrasyon sırasında oluşan uyumsuzluklar, Kalman filtresi ve diğer optimizasyon yöntemleri ile büyük ölçüde giderilmiştir. Bu süreç, GNSS ve IMU verilerinin birlikte kullanıldığında yüksek doğruluk elde edilebileceğini göstermiştir. Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefondan alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. MATLAB programlama dili sayesinde uygulanan kalman filtrelemesi ve butterworth filtrelemesi sayesinde konum doğruluğunun artılabildiği gözlemlenmiştir.

V. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışma, Bebek bölgesinde iPhone 13 Pro kullanılarak kaydedilen GNSS ve IMU verilerinin MATLAB ortamında filtrelenerek entegre edilmesiyle bir yol haritası oluşturmayı amaçlamaktadır. GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonu sayesinde konum bilgilerindeki hata payı azaltılmakta ve daha hassas bir konum belirleme sağlanmaktadır. Bu durum hem teorik hem de pratik uygulamalar için önemli katkılar sunmanın yanı sıra; düşük maliyetli sensörlerden elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi ile konum doğruluğunun artırılması uygulamalarına önemli katkılar sunmaktadır.

GNSS verileri, yüksek hassasiyeti sayesinde yürüyüş rotasının doğru bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Ancak GNSS verilerinin sinyal kaybı yaşanan bölgelerde, IMU verilerinin tamamlayıcı bir rol oynadığı görülmüştür. IMU verileri, özellikle GNSS verilerinin doğruluğunu artırmak için bir destekleyici unsur olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte, IMU sensörlerinden kaynaklanan hatalar zamanla birikerek entegre haritalarda sapmalara neden olmuştur. Bu durum, entegrasyon sırasında kullanılan yöntemlerin ve filtreleme tekniklerinin önemini ortaya koymaktadır.

Kalman filtresi, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda etkin bir rol oynamış ve hata paylarının minimize edilmesine katkı sağlamıştır. Optimizasyon sürecinde, süreç gürültüsü ve ölçüm gürültüsü kovaryans değerleri dikkatlice ayarlanmış, GNSS verilerine daha fazla ağırlık verilmiştir. Bu, entegre haritanın GNSS yol haritasına daha yakın bir görünüm sunmasını sağlamıştır. Ayrıca, GNSS ve IMU verilerinin zaman serisiyle uyumlu hale getirilmesi, senkronizasyon hatalarını en aza indirmiştir.

Bu çalışma iPhone 13 Pro ile elde edilen GNSS ve IMU verilerinin birleştirilmesi açısından ilk defa uygulanmasının yanı sıra, iPhone 13 Pro GNSS verilerine herhangi bir ek anten ya da post-process işlemi ile doğruluk artırma çalışması yapılmadan iki verinin birleştirilmesi açısından literatüre yenilikler katmaktadır. Bu çalışmanın bulguları, GNSS ve IMU verilerinin entegrasyonunda kullanılan tekniklerin doğruluğunu ortaya koymuş ve yürüyüş rotalarının daha hassas bir şekilde haritalanabileceğini göstermiştir. Gelecekteki çalışmalar, daha gelişmiş IMU sensörlerinin kullanımı ve ileri düzey filtreleme tekniklerinin uygulanmasıyla doğruluğun daha da artırılabilir. Bunun yanında, gerçek zamanlı veri işleme ve daha karmaşık algoritmaların entegrasyonu, bu tür sistemlerin performansını artırabilir.

Yapılan uygulama, özellikle akıllı telefonlar için oldukça pratik ve maliyet açısından verimlidir, çünkü sistemde halihazırda bulunan GNSS ve IMU sensörleri sayesinde bu yöntemlerin uygulanması yalnızca telefon

için üretilen basit yazılımlar ile mümkün olabilmektedir. Bu uygulama, GPS Tracks ve SensorLog uygulamaları sayesinde, iki verinin de telefondan alınması kolay bir şekilde mümkün hale gelmiştir. Ayrıca, bu uygulama iPhone 13 Pro GNSS ve IMU verilerinin birbirine entegrasyonu açısından da literatürde yapılan ilk çalışma olma özelliğinin yanında, başka alan ya da cihazlarda kullanılan düşük maliyetli GNSS ve IMU veri entegrasyonu çalışmalarına çeşitli yenilikler getirmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, bundan sonra yapılacak konum bazlı sistemlerin geliştirilmesi ve uygulanması için önemli bir referans oluşturmaktadır. Elde edilen deneyimler, düşük maliyetli GNSS ve IMU verilerinin farklı uygulamalarda nasıl daha etkili bir şekilde kullanılabileceğine dair yol gösterici bilgiler sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Kilroy, B. (1999). Two Decades of Development and Evaluation of GPS Technology for Natural Resource Applications.
- [2] Sullivan, M. (2012). A Brief History of GPS. PCWorld.
- [3] Charles, D. (2007). GPS Goes Mainstream. NPR, Technology Section, <https://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=17611103>
- [4] Van Diggelen, F. (2009). WIRELESS-The Smartphone Revolution-Seven Technologies That Put GPS in Mobile Phones Around the World—The How and Why of Location's Entry into Modern Consumer Mobile Communications. GPS World, 20(12), 36.
- [5] Banville, S., & Van Diggelen, F. (2016). Precision GNSS for Everyone. GPS World, 27(11), 43-48.
- [6] Merry, K., & Bettinger, P. (2019). Smartphone GPS Accuracy Study in an Urban Environment. PLoS One, 14(7), e0219890.
- [7] Robustelli, U., Baiocchi, V., & Pugliano, G. (2019). Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis. Electronics, 8(1), 91.
- [8] Robustelli, U., Paziewski, J., & Pugliano, G. (2021). Observation Quality Assessment and Performance of GNSS Standalone Positioning with Code Pseudoranges of Dual-frequency Android Smartphones. Sensors, 21(6), 2125.
- [9] Zhao, H., & Wang, Z.Y. (2012). Motion Measurement Using Inertial Sensors, Ultrasonic Sensors, and Magnetometers with Extended Kalman Filter for Data Fusion. IEEE Sensors Journal, 12(5), 943-953.

- [10] Tanenhaus, M., Carhoun, D., Geis, T., Wan, E., & Holland, A. (2012). Miniature IMU/INS with Optimally Fused Low Drift MEMS Gyro and Accelerometers for Applications in GPS-denied Environments. In *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012*, Myrtle Beach, South Carolina (pp. 259-264).
- [11] Zhu, R., & Zhou, Z. (2004). A Real-time Articulated Human Motion Tracking Using Tri-axis Inertial/Magnetic Sensors Package. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(2), 295-302.
- [12] Ahmad, N., Ghazilla, R.A.R., Khairi, N.M., & Kasi, V. (2013). Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262.
- [13] Chu, T., & Akos, D. (2011). Assisted GNSS—Performance Results of Multiplexed Measurements, Limited Bandwidth, and a Vectorized Implementation. In *Proceedings of the 2011 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, San Diego, CA, USA (pp. 1007-1018).
- [14] Park, M., & Gao, Y. (2008). Error and Performance Analysis of MEMS-based Inertial Sensors with a Low-cost GPS Receiver. *Sensors*, 9, 2240-2261.
- [15] Godha, S., & Cannon, M.E. (2007). GPS/MEMS INS Integrated System for Navigation in Urban Areas. *GPS Solutions*, 11, 193-203.
- [16] Bijker, J., & Steyn, W. (2008). Kalman Filter Configurations for a Low-cost Loosely Integrated Inertial Navigation System on an Airship. *Control Engineering Practice*, 16, 1509-1518.
- [17] Chu, T., Guo, N., Backén, S., & Akos, D. (2012). Monocular Camera/IMU/GNSS Integration for Ground Vehicle Navigation in Challenging GNSS Environments. *Sensors*, 12(3), 3162-3185.
- [18] Tamimi, R. (2022). Relative Accuracy Found within iPhone Data Collection. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 303-308.
- [19] Cui, Y., & Ge, S.S. (2003). Autonomous Vehicle Positioning with GPS in Urban Canyon Environments. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(1), 15-25.
- [20] Jafarnia-Jahromi, A., Broumandan, A., Nielsen, J., & Lachapelle, G. (2012). GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques. *International Journal of Navigation and Observation*, Article ID 127072.
- [21] Seo, J., Walter, T., Marks, E., Chiou, T.Y., & Enge, P. (2007). Ionospheric Scintillation Effects on GPS Receivers during Solar Minimum and Maximum. *International Beacon Satellite Symposium 2007*, Boston, MA (pp. 11-15).
- [22] Shin, Y., Lee, C., Kim, E., & Walter, T. (2021). Adopting Neural Networks in GNSS-IMU Integration: A Preliminary Study. In *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)* (pp. 1-7). IEEE.
- [23] Sandru, F.D., Nanu, S., Silea, I., & Miclea, R.C. (2016). Kalman and Butterworth Filtering for GNSS/INS Data. In *2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)* (pp. 257-260). IEEE.
- [24] Butterworth, S. (1930). On the Theory of Filter Amplifiers. *Experimental Wireless and Wireless Engineering*, 7, 536-541.
- [25] Erer, K.S. (2007). Adaptive Usage of the Butterworth Digital Filter. *Journal of Biomechanics*, 40(13), 2934-2943.
- [26] Shouran, M., & Elgamli, E. (2020). Design and Implementation of Butterworth Filter. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 9(9), 7975-7983.
- [27] Chui, C.K., & Chen, G. (2017). *Kalman Filtering: With Real-time Applications*. Springer.
- [28] Shrotriya, A. (2010). *Robot Path Planning and Tracking of a Moving Target Using Kalman Filter* (Doctoral dissertation). California State University.
- [29] İlvan, A., & Bostancı, B. (2021). İnsansız Hava Araçları İçin Düşük Bütçeli INS/GNSS Sistemi Entegrasyonunda Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Koksuz Kalman Filtresi Yöntemlerinin Karşılaştırılması.
- [30] İnce, C.D. (1999). *Dinamik Sistemlerin GPS ve Kalman Filtresi ile Anlık Olarak İzlenmesi* (Doctoral dissertation). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

The Effect of the Pandemic on the Carbon Footprint of Health Care Institutions: A Case Study

Senem TEKSOY BAŞARAN ¹, Mehmed Kamil İLTER ²

¹*İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, İstanbul, Türkiye*

²*İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Çevre ve Enerji Sistemleri Mühendisliği Programı, İstanbul, Türkiye*

Abstract

Healthcare institutions contribute significantly to global greenhouse gas (GHG) emissions due to their energy consumption, material use, and waste generation. The COVID-19 pandemic altered hospital activities, affecting their carbon footprint through changes in patient visits, medical procedures, and resource consumption. This study examines the GHG emissions of two university hospitals in Istanbul, one with 85 beds and another with 95 beds, between the years of 2018 and 2022. Emissions were categorized as direct (Category 1), energy indirect (Category 2), and other indirect (Categories 3 and 4), following ISO 14064-1, IPCC, and GHG Protocol standards. Results indicate that the highest emissions per patient occurred in 2020 (10.6 and 8.2 kgCO₂e/person) when the pandemic was at its peak. By 2022, with a nearly twofold increase in patient numbers, per capita emissions decreased by up to 36%. Indirect emissions surged in 2020 due to increased use of single-use medical materials and waste production. These findings highlight the pandemic's dual impact on hospital carbon footprints and emphasize the need for sustainable healthcare strategies.

Keywords: Climate change, Greenhouse gas emissions, Healthcare sector carbon footprint, Pandemic impact.

I. INTRODUCTION

The concept of carbon footprint has gained significant attention in recent years due to its crucial role in climate change mitigation and sustainability planning across all sectors. A carbon footprint refers to the total amount of greenhouse gases (GHGs) emitted directly and indirectly by an entity, activity, or product, expressed in terms of carbon dioxide equivalent (CO₂e). This comprehensive metric offers a holistic perspective on environmental impact, making it a valuable tool for assessing sustainability by identifying emission hotspots, evaluating resource efficiency, and guiding mitigation strategies across the entire value chain [1].

Among the sectors with substantial environmental footprints, healthcare institutions, stand out due to their round-the-clock operations, high energy demands, and intensive material consumption. Hospitals require continuous energy supply for heating, cooling, sterilization, ventilation, and operation of medical equipment. Additionally, they rely heavily on single-use medical devices, pharmaceuticals, cleaning agents, and laboratory chemicals, many of which have carbon-intensive supply chains that add to their indirect emissions [2, 3].

National-level assessments have highlighted the significant contribution of healthcare systems to overall greenhouse gas emissions, emphasizing the importance of integrating carbon management into healthcare sustainability strategies. For example, healthcare activities account for 4.6% of national carbon emissions in Japan, 8.5% in the United States, 4.6% in Canada, 7.0% in Australia, 3.5% in India, and 2.7% in China [4].

Despite growing awareness, systematic carbon footprint monitoring at the individual hospital level remains limited in many countries, including Türkiye.

While several studies have evaluated carbon footprints of individual hospital services or care pathways—such as surgical procedures, imaging departments, or waste management systems—comprehensive assessments at the organizational level remain limited. As highlighted in a recent systematic review by Kouwenberg et al. [5], most hospital-related carbon footprint research tends to focus on isolated clinical or operational activities rather than capturing emissions across the full institutional system.

In contrast, whole-hospital assessments that encompass multiple emission scopes and multi-year trends are relatively rare in the literature. A case study [6] conducted in an emergency hospital complex in Shanghai validated the model's applicability, revealing that dynamic factors influenced nearly half of the hospital's carbon footprint. The operation phase was the dominant contributor (73.1%), mainly driven by medical equipment (43.3%) and conventional energy systems (>50%). Notably, Lau et al. [7] conducted a hybrid assessment of the Erasmus University Medical Center in the Netherlands, revealing that over 70% of the hospital's emissions originated from scope 3 activities, particularly the procurement of pharmaceuticals and medical supplies. This underscores the significance of comprehensive, institution-wide evaluations.

II. MATERIAL AND METHOD

The study examined the carbon footprint of two hospitals, covering the years 2018 to 2022. Data were collected on energy consumption, patient visits, waste generation, and medical supply use. Emission calculations followed ISO 14064-1:2018 [10] and guidelines from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (2006) [11] and Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), developed by World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) [12].

2.1. Case Study Hospitals

The study focused on two foundation-owned university hospitals within the Istanbul Metropolitan Municipality, one located on the Anatolian side and the other on the European side. Both hospitals provide a wide range of healthcare services, operating 24/7 with intensive care units, surgical facilities, laboratories, emergency departments, and advanced treatment units. Equipped with state-of-the-art operating rooms, they offer various surgical procedures, including

microscopic, endoscopic, arthroscopic, laparoscopic, and microsurgical operations across multiple disciplines such as general surgery, gynecology, urology, orthopedics, ophthalmology, otolaryngology, neurosurgery, and plastic surgery. Hospital A has 85 beds with a total area of 6.500 m² and Hospital B has 95 beds with a total area of 9.500 m². Average number of personnel and patients between the years of 2018 and 2022 were 480 and 186 500 for Hospital A and, 585 and 214 000 for Hospital B, respectively. During the study period, neither hospital had a formal sustainability policy or active greenhouse gas mitigation strategy in place that could influence their operational emissions.

2.2. GHG Emission Categories

The greenhouse gas (GHG) emission inventories of two healthcare institutions from 2018 to 2022 were prepared in accordance with the ISO 14064-1 standard, which provides guidelines for calculating and reporting organizational-level emissions. The study employed a fundamental calculation approach, integrating methodologies from the IPCC Guidelines and GHG Protocol, which are globally recognized frameworks.

The emission inventory was developed through a systematic process: defining organizational and operational boundaries, collecting relevant activity data, and applying emission factors (EFs) sourced from literature, databases, and official reports.

GHG emissions were categorized as follows:

- Category 1 (Direct Emissions): Emissions from heating (natural gas boilers), on-site electricity generation (generators), transportation (cars, ambulances), and fugitive emissions from cooling systems and fire suppression.
- Category 2 (Indirect Emissions from Purchased Energy): Emissions from electricity consumption.
- Category 3 (Other Indirect Emissions): Transportation-related emissions from patient visits, staff commuting, business travel, and supply chain logistics.
- Category 4 (Indirect Emissions from Purchased Goods and Services): Emissions from pharmaceuticals, medical supplies, waste disposal, wastewater treatment, and food services.

Categories 5 and 6, related to product emissions and other sources, were deemed not applicable in this study. Well to Tank or Well to Wheel emissions were not included in GHG calculations.

2.3 Activity Data and Emission Factors

The activity data, their units and sources that were used to calculate the GHG emissions in each of the emission categories are summarized in Table 1. These data have been recruited from relevant administrative units such as technical services, purchasing, human resources, accounting and support services.

Table 1. GHG Emission Inventory Activity Data

Category/ Source/Activity Data	Unit	Data Source
Category 1: Direct GHG Emissions and Removals		
Category 1 - Stationary Combustion		
Natural Gas Boiler, Natural Gas Consumption	Sm ³	Natural gas invoice data
Generator, Fuel Oil Consumption	L	Recorded purchases via software
Category 1 - Mobile Combustion		
Automobile, Bus, Ambulance, Fuel Consumption (Gasoline, Diesel)	L	Vehicle tracking system data
Category 1 - Fugitive Emissions		
Cooling Equipment, Refilled Refrigerant Amount	kg	Service provider reports
Fire Extinguishers, Fire Suppression Gas Consumption	kg	Reports from authorized service providers
Category 2: Indirect Emissions from Purchased Energy		
Electricity Consumption, Purchased Electricity	kWh	Electricity invoices
Category 3: Indirect GHG Emissions from Transportation		
Employee Commute, Distance	km	Employee surveys
Patient Transportation, Distance	km	Google API
Transportation of Purchased Goods, Distance	km	Delivery records and Google API
Category 4: Indirect GHG Emissions from Purchased Goods/Services		
Purchased Medications, Quantity	Units	Hospital medication distribution software
Purchased Non-Medical Supplies, Quantity	Units	Procurement records via software
Purchased Food & Beverage Services, Menu and Service Count	Units	Carbon footprint records from outsourced service providers
Waste Disposal, Waste Amount	tons	Environmental Information System (EÇBS) application, municipal records
Wastewater Treatment, Wastewater Volume	L	Water invoices

Emission factors were carefully selected to minimize uncertainty and errors for each emission source. A comprehensive literature review was conducted, prioritizing national studies and reports where

available. In cases where country-specific emission factors were not accessible, relevant international sources and scientific studies were referred to determine appropriate values.

For emissions directly related to fossil fuel consumption, such as those categorized under Category 1 emissions, national data sources i.e. the emission factors reported in Türkiye's National Inventory Reports (NIR) [13] for relevant years, which is submitted annually to the UNFCCC Secretariat, were used.

The calculation of emissions from purchased electricity utilized emission factors provided in the Turkey National Electricity Grid Emission Factor Information Form, published annually by the Ministry of Energy and Natural Resources (MoENR) [14]. Emission factors for refrigerants and fire suppression equipment were sourced from IPCC Assessment Reports, specifically from the Global Warming Potential (GWP) tables [15].

For water consumption (bottled water dispensers were excluded) and wastewater treatment related emissions the emission factors for network water usage and wastewater treatment published by Department for Environment, Food and Rural Affairs of United Kingdom (DEFRA) between 2018 and 2023 were used [16].

Transportation-related emissions were categorized into patient travel, staff commuting, purchased goods transportation, and business travel. Where detailed data on vehicle type and fuel were available, appropriate emission factors were applied. For instance, emissions from the transportation of purchased goods were based on DEFRA emission factors for diesel commercial vehicles [16].

However, due to the lack of specific data on the type of vehicles and fuel used by patients and staff, average vehicle emission factors determined by the International Energy Agency (IEA) were applied [17]. Similarly, for public transportation, IEA-derived emission factors were used due to the absence of precise data on vehicle type, fuel, and transfer frequency. Maximum GHG emission for business travel per year was calculated as 2,6 tCO₂e based on travelled air miles multiplied by the average EF of DEFRA short haul-Europe economy class 0,140625 tCO₂e per passenger mile Hence, emissions related to business travel were omitted since they were estimated approximately to have a 0,025% share of the overall emissions.

To estimate emissions from purchased goods, the types of materials used were identified, and appropriate emission factors were sourced from DEFRA and the Villota-Paz et al. (2023) [18] study for cleaning

chemicals. Emission calculations for pharmaceuticals were based on price-based emission factors from Tennison et al. (2021) [19]. Finally, emissions from waste were determined according to waste type and disposal method, utilizing emission factors from literature [20, 21], American Petroleum Institute (API) [22], and DEFRA database [15].

Emission factors used in this study are summarized in Table 2.

Table 2. Emission Factor used in the study [13-21]

Category/ Source	EF	Data Source
Category 1: Direct GHG Emissions and Removals		
Category 1 - Stationary Combustion (tCO₂e/TJ)		
Natural Gas	53.87-55.77	NIR (2021-
Fuel Oil	72.53	2023)
Category 1 - Mobile Combustion (tCO₂e/TJ)		
Diesel	75.27	
Category 2: Indirect Emissions from Purchased Energy (tCO₂e/MWh)		
Electricity	619.8-648.8	MoENR
Category 3: Indirect GHG Emissions from Transportation		
Transportation of Employees and Patients (kgCO ₂ e/km)		
Public	0.054	IEA
Passenger vehicle	0.158-0.167	DEFRA
Transportation of Purchased Goods (kgCO ₂ e/km)		
HGV*-diesel	0.854	DEFRA
Category 4: Indirect GHG Emissions from Purchased Goods/Services		
Pharmaceutical	0.57 kgCO ₂ e/GBP	Tennison et al., 2021
Non-Medical Supplies (kgCO ₂ e/ton)		
Wood	312.61	
Glass	1 402.77	
Food	3 701.40	DEFRA,
Paper	919.40	Material Use,
Metal	5 268.56	2018
Plastic	3 116.29	
Textile	22 310.00	
Chemical	357.00	Villota-Paz et al. (2022)
Waste Disposal (kgCO ₂ e/ton)		
Lubricant oil	2 930	API, 2023
Contaminated packaging	338	Yaman, 2020
Chemical liquids	1 074	
Cytotoxic drugs	249	
Batteries	65	Rizan et al., 2021
Pathologic drugs	1 074	
Infected waste	569	
Paper/ Cardboard	21.32	DEFRA
Domestic	0.48	DEFRA
Water use	0.251 kgCO ₂ e/m ³	DEFRA (2018-2020)
Wastewater treatment	0.478 kg CO ₂ e/m ³	DEFRA (2018-2020)

*Heavy Goods Vehicle

2.3. GHG Emission Calculations

The calculation approach for greenhouse gas (GHG) emissions in the two hospitals was based on multiplying relevant activity data with appropriate emission factors obtained from literature and national reports. The calculation formula for direct emissions from natural gas fired boilers is given in Equation (1):

$$GHG \text{ Emission} = \frac{\text{Fuel consumption (Sm}^3\text{)} \times \text{NCV (TJ/Sm}^3\text{)} \times \text{CF} \times \text{OF} \times \text{EF}_{SG} \text{ (tGHG/TJ)}}{1} \quad (1)$$

where; NCV: Net Calorific Value, CF: Conversion Factor, OF: Oxidation Factor (assumed as 1), EF: Emission Factor.

2.3. Uncertainty analysis

An uncertainty analysis was conducted for the greenhouse gas (GHG) emission inventories prepared in this study, specifically for direct and energy-related carbon dioxide emissions. The analysis followed the methodology outlined in the GHG Protocol guidelines [12]. According to this approach, total inventory uncertainty was calculated as the cumulative uncertainty sum of activity data and emission factors, using Equation (2):

$$\pm u = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i * I_i)^2}}{M} \quad (2)$$

where u represents total uncertainty (%), H is the CO₂ emissions from source i, I is the uncertainty of source i, and M is the total CO₂ emissions.

Uncertainty values were determined separately for each data source. If emissions were calculated based on measured data from instruments such as meters, the Maximum Allowable Error (MAE) values defined in the Measuring Instruments Regulation [23] were considered. For other activity data and EFs, uncertainties were selected based on national reports and expert evaluations.

III. RESULTS AND DISCUSSION

GHG emission calculations in ton of carbon dioxide equivalents (tCO₂e) were performed for each emission source under each relevant emission category as per the collected activity data and suitable emission factors. The results were summarized for Hospital A and Hospital B in Table 3 and Table 4, respectively.

Table 3. GHG Emissions of Hospital A between 2018 and 2022

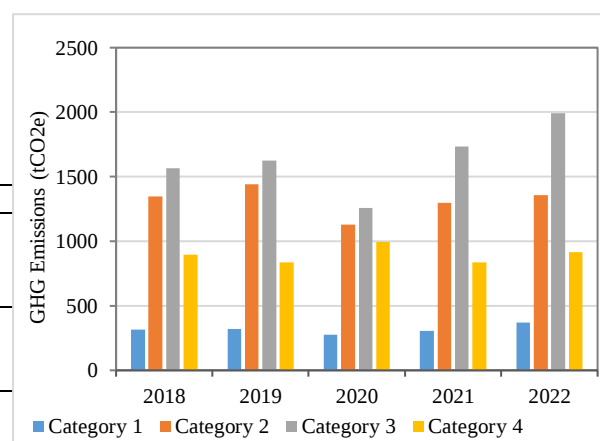
GHG Emission Category	2018	2019	2020	2021	2022
Category 1					
Stationary comb.	274	268	221	262	296
Mobile comb.	23	23	33	30	26
Fugitive emissions	18	31	23	13	48
Category 2					
Pur. electricity	1 348	1 444	1 132	1 296	1 357
Category 3					
Patients commute	1 189	1 243	882	1 344	1 595
Personnel commute	125	117	129	134	148
Trans. of pur. goods	254	266	247	256	250
Category 4					
Pur. Cons.	670	594	760	574	627
Pur. Pharm.	192	211	195	223	251
Waste disposal	20	35	40	37	38
Water and Wastewater	35	32	40	39	38
Total	4 147	4 263	3 699	4 208	4 673

Table 4. GHG Emissions of Hospital B between 2018 and 2022

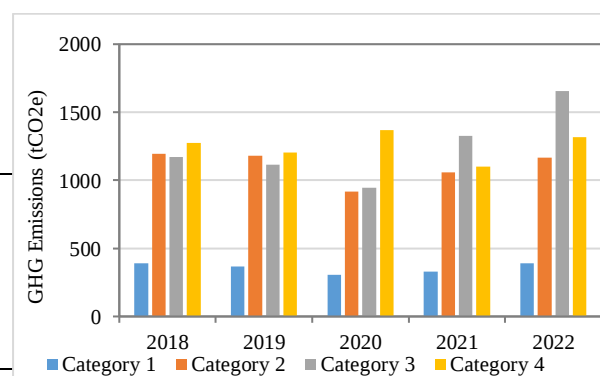
GHG Emission Category	2018	2019	2020	2021	2022
Category 1					
Stationary comb.	316	303	237	278	329
Mobile comb.	30	30	43	38	34
Fugitive emissions	47	36	27	15	27
Category 2					
Pur. electricity	1 193	1 182	918	1 060	1 169
Category 3					
Patients commute	944	889	689	1,096	1,373
Personnel commute	135	136	125	120	131
Trans. of pur. goods	90	88	129	112	152
Category 4					
Pur. Cons.	926	806	1,009	738	776
Pur. Pharm.	307	360	309	319	497
Waste disposal	22	40	46	42	43
Water and Wastewater	42	40	50	45	45
Total	4 052	3 911	3 580	3 862	4 574

Total annual GHG emissions varied between 3 699 tCO₂e and 4 673 tCO₂e for Hospital A; and between 3,580 tCO₂e and 4,574 tCO₂e for Hospital B. The % distribution of emissions among the four categories indicated that category 1, 2, 3 and 4 emissions varied between 7-10 %, 26-34 %, 26-43 % and 20-39 % of total GHG emissions, respectively. The breakdown of GHG among category 1 emissions showed that CO₂ emissions accounted for 87-96% of total GHG emissions in that category. The uncertainty analysis was done for 2018 category 1 and 2 CO₂ emission calculations of Hospital A which was assumed to represent all other inventory years as the activity data, EF and relevant assumptions did not change for these; and the uncertainty was calculated as ± 5.84 %.

GHG emission trends (Figure 1) observed in the two hospitals between 2018 and 2022 reveal significant variations due to the COVID-19 pandemic and subsequent recovery phases.



(a)



(b)

Figure 1. Variation of GHG Emissions as per emission categories between 2018-2022 for (a) Hospital A and (b) Hospital B

Key findings from the data indicate certain general trends such that; 2020 showed a distinct decline in stationary combustion emissions (Category 1) and electricity consumption (Category 2) in both hospitals, correlating with reduced hospital activities during the peak of the pandemic. Conversely, mobile combustion

and fugitive emissions fluctuated, with peaks in 2020 likely due to emergency preparedness measures and increased ventilation/heating needs. It was also observed that Post-pandemic recovery (2021-2022) led to a surge in overall emissions, with stationary combustion and electricity consumption surpassing pre-pandemic levels.

Findings also allowed for certain category-specific observations which were summarized as below;

Category 1 Direct Emissions (Stationary and Mobile Combustion, Fugitive Emissions)

- Stationary combustion (fuel usage in hospital operations) dropped significantly in 2020 but rebounded in 2022.
- Mobile combustion (fuel consumption in ambulances and hospital vehicles) peaked in 2020 due to increased emergency services.
- Fugitive emissions (leakage from refrigerants and fire suppression systems) varied, with a substantial rise in 2022, indicating increased Heat, Ventilation, Air Conditioning (HVAC) system reliance and maintenance cycles.

Category 2: Purchased Electricity

- A sharp drop in electricity consumption in 2020 (as low as 917.58 MWh in Hospital B) was likely due to reduced patient intake and fewer operational services.
- By 2022, electricity consumption nearly returned to pre-pandemic levels, reflecting increased hospital activity.

Category 3: Indirect Emissions from Patient & Personnel Transport and Logistics

- Patient commute emissions declined drastically in 2020 due to movement restrictions and lower patient visits.
- Personnel commute emissions remained relatively stable, with a minor dip in 2020 but increasing again in 2022.
- Transportation of purchased goods emissions remained relatively stable, suggesting continued demand for essential medical supplies despite fluctuating hospital activities.

Category 4: Emissions from Purchased Goods, Pharmaceuticals, Waste, and Water

- Purchased consumables and pharmaceuticals emissions peaked in 2020, reflecting increased demand for medical supplies, including PPE, disinfectants, and medications.
- Waste disposal emissions surged in 2020, highlighting the environmental impact of single-use medical waste generated during the pandemic.
- Water and wastewater emissions remained relatively stable, with minor fluctuations, indicating consistent water demand for sanitation purposes.

Our findings agree with the results of the study by Morooka et al. (2022) [9] who investigated the impact of the COVID-19 pandemic on the carbon footprint of the Nagoya University Hospital and Medical Research Centre over a decade, specifically from April 2010 to March 2021. Their findings also revealed that the pandemic significantly altered the hospital's operational dynamics, leading to changes in carbon emissions such that during the COVID-19 epidemic, the carbon footprint decreased slightly, likely which was attributed to the reduced number of patients. However, they observed that carbon footprint per admission increased, which was attributed to more complicated patient backgrounds because of the ageing population. They also noted a marked rise in emissions from medical waste, which surged due to the increased use of disposable personal protective equipment (PPE) and other medical supplies.

GHG emission intensities of the hospitals were also determined as per capita and per square meter of inner area as shown in Table 5. Average annual total GHG emissions per patient between 2018 and 2020 is calculated as 21.2 kgCO₂e.

Table 5. GHG Emission intensities for Hospital A and B between 2018 and 2022

Years	2018	2019	2020	2021	2022
Number of patients					
Hosp. A	172 734	183 162	132 982	202 527	240 992
Hosp. B	197 361	188 472	149 832	237 492	297 482
Total GHG Emissions (tCO₂e)					
Hosp. A	4 147	4 263	3 699	4 208	4 673
Hosp. B	4 052	3 911	3 580	3 862	4 574
GHG Emissions per patients (kgCO₂e/patient/a.)					
Hosp. A	24.0	23.3	27.8	20.8	19.4
Hosp. B	20.5	20.8	23.9	16.3	15.4
Carbon intensity (kgCO₂e/m²/a.)					
Hosp. A	638.0	655.9	569.1	647.3	718.9
Hosp. B	415.6	401.1	367.2	396.1	469.1

There are a limited number of studies that report GHG emissions from healthcare institutions and the results have to be carefully compared due to the differences in calculation approaches each may have that could affect the results such as the emission categories included, carbon intensity of electricity used, scale of activity etc. The studies found reported per capita and per meter squared category 1 and 2 GHG emissions as 8.02 kgCO₂e/cap/a. and 55.4 kgCO₂e/m²/a. [24]; 7.71 kgCO₂e/cap/a. and 99 kgCO₂e/m²/a. [25], 4.8 kgCO₂e/cap/a. [3] and 96 kgCO₂e/m²/a. [26], from the US, China, Switzerland and Spain, respectively. In this study, average GHG emission intensities considering category 1 and 2 emissions were found as 8.99 and 7.1 kgCO₂e/cap/a. and 251.1 and 149.9 kgCO₂e/m²/a. These figures reported for Categories 1 and 2 were

calculated separately for comparative purposes using data from Tables 3 and 4; these are not shown in Table 5, which reflects total emissions from all categories. These intensity figures indicate that the carbon intensities in studied Turkish hospitals are similar to global examples in terms of per capita emissions however they are almost two folds higher than the reported average values per m^2 . Calculation of emission intensity from the data of Morooka et al. (2022) [9] yielded an average of $359 \text{ kgCO}_2\text{e}/m^2/a$ from total GHG emissions including category 3 and 4, whereas in our study average for Hospital A and Hospital B were calculated as 646 and $409 \text{ kgCO}_2\text{e}/m^2/a$ respectively.

In 2020, Hospital A experienced an increase in per patient GHG emissions by approximately 9%, coinciding with the onset of the COVID-19 pandemic, while its area-based carbon intensity decreased due to reduced overall hospital occupancy. By 2021, patient numbers in both hospitals had surpassed pre-pandemic levels, while Category 2 emissions (purchased electricity) did not fully recover to pre-pandemic levels. This discrepancy led to a significant reduction in per capita carbon intensity from 2021 onwards.

Regarding area-based carbon intensity, both hospitals experienced a notable decline in 2020 compared to 2021, with reductions of approximately 21% and 23%, respectively. Hospital B, which has a larger usable area and higher patient density, exhibited a significantly lower area-based carbon load compared to Hospital A. Analysis of activity data and emission calculations suggests that Hospital B operated within a larger space while consuming less electricity, contributing to its lower area-based carbon footprint.

Several factors may account for the substantial differences in carbon intensity between the two hospitals:

- The distribution of outpatient clinics and inpatient beds: Outpatient clinics primarily operate during the day, whereas inpatient rooms require continuous energy supply.
- The functional allocation of hospital beds: Facilities such as neonatal and general intensive care units, physical therapy, and rehabilitation departments may have varying energy demands due to their operational characteristics.
- The use of energy-efficient lighting systems: Hospital B is a new hospital that may have adopted newer, more efficient lighting technologies.
- Architectural planning and natural lighting efficiency: Optimized architectural design may have enabled more effective placement of lighting systems in Hospital B.
- Staff awareness of environmental sustainability: Greater employee engagement in sustainability initiatives and energy conservation practices could have contributed to lower emissions in Hospital B.

These factors collectively highlight the importance of hospital design, operational structure, and sustainability strategies in mitigating carbon emissions and improving energy efficiency in healthcare institutions.

IV. CONCLUSION

During the COVID-19 pandemic, hospitals experienced major operational changes, including increased demand for critical care, changes in medical waste management, and reductions in non-essential medical procedures. Understanding these shifts is essential for developing strategies to reduce emissions while maintaining healthcare quality.

This study highlights the dual impact of the COVID-19 pandemic on hospital carbon footprints. While overall emissions per patient peaked during the pandemic due to operational inefficiencies, the gradual normalization of healthcare services led to emission reductions per patient in 2022. However, the increased reliance on single-use materials underscores the need for improved sustainability policies in healthcare institutions.

To mitigate future environmental impacts, hospitals should invest in energy-efficient technologies, implement circular economy principles for waste reduction, and develop comprehensive emission monitoring frameworks. Future research should explore the long-term effects of healthcare operational changes on carbon footprints and evaluate alternative sustainability strategies.

REFERENCES

- [1] Čuček, L., Klemeš, J. J., & Kravanja, Z. (2012). A review of footprint analysis tools for monitoring impacts on sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 34, 9-20.
- [2] Walsh, S.J., O'Leary, A., Bergin, C., Lee, S., Varley, A., Lynch, B (2024). Primary healthcare's carbon footprint and sustainable strategies to mitigate its contribution: a scoping review. *BMC Health Serv Res* (24), 1630.
- [3] Nicolet, J., Mueller, Y., Paruta, P., Boucher, J., Senn, N. (2022) What is the carbon footprint of primary care practices? A retrospective life-cycle analysis in Switzerland. *Environ Health* (21), 3.
- [4] Pichler, P.P., Jaccard, I.S., Weisz, U., Weisz, H. (2019). International comparison of health care carbon footprints. *Environ. Res. Lett.* (14) 064004. review. *J Adv Nurs*. 2023 Aug;79(8):2830-2844. doi: 10.1111/jan.15671. Epub 2023 May 17. PMID: 37198974.

- [5] Kouwenberg, L.H.J.A, Cohen, E.S, Hehenkamp W.J.K., Snijder, L.E., Kampman, J.M., Küçükkeles, B., Kourula, A., Meijers, M.H.C., Smit, E.S., Sperna Weiland, N.H., Kringos, D.S. (2024). The Carbon Footprint of Hospital Services and Care Pathways: A State-of-the-Science Review. *Environ Health Perspect.* 132 (12), 126002, 2024.
- [6] Yongkui Li, Yong Zha, Minhao Li, Lili Qian (2025). Evaluating the carbon footprint of a hospital from the dynamic life cycle perspective: A case study in Shanghai, *Building and Environment*, 277, 112950.
- [7] Lau, I., Burdorf, A., Hesselings, S., Wijk, L., Tauber, M., & Hunfeld, N. (2024). The carbon footprint of a Dutch academic hospital—using a hybrid assessment method to identify driving activities and departments, *Frontiers in Public Health*, 12, 1380400.
- [8] Baş, S., Sur, K. (2023). The Impact of COVID-19 on Healthcare Systems: Challenges and Sustainability Measures, *Journal of Public Health Research*, 14 (2), 198-213.
- [9] Morooka, H., Yamamoto, T., Tanaka, A., Furuhashi, K., Miyagawa Y., Maruyama, S. (2022) Influence of COVID-19 on the 10-year carbon footprint of the Nagoya University Hospital and medical research centre, *Globalization and Health* 18, 92.
- [10] ISO 14064-1, "Greenhouse Gases – Part 1: Specification with Guidance at the Organization Level for Quantification and Reporting of Greenhouse Gas Emissions and Removals," *International Organization for Standardization (ISO)*, 2018.
- [11] IPCC 2006, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- [12] GHG Protocol, "Corporate Standard: A Guide to Measuring and Managing Greenhouse Gas Emissions," *World Resources Institute (WRI) & World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)*, 2023.
- [13] Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change. (2018-2022). National Inventory Report (NIR): Greenhouse Gas Emissions of Türkiye Submitted to UNFCCC. Retrieved from <https://unfccc.int/documents/>
- [14] Ministry of Energy and Natural Resources. (2018-2022). Grid Emission Factor Information Forms. Retrieved from <https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru>
- [15] IPCC, "Assessment Reports on Global Warming Potential and Emission Factors," *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Reports*, 2018-2022.
- [16] Department for Environment, Food & Rural Affairs (DEFRA). (2018-2022). UK government GHG conversion factors for company reporting: 2018-2022 datasets. Retrieved from <https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>
- [17] International Energy Agency (IEA). (2019). GHG intensity of passenger transport modes. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/ghg-intensity-of-passenger-transport-modes-2019>
- [18] Villota-Paz, J.M., Osorio-Tejada, J.L., Morales-Pinzón, T. (2023). Comparative life cycle assessment for the manufacture of bio-detergents *Environ Sci Pollut Res* 30, 34243–34254.
- [19] Tennison I, Roschnik S, Ashby B, Boyd, R., Hamilton, I., Oreszczyn, T., Owen, A., Romanello, M., Ruyssevelt, P., Sherman, J.D., Smith, A.Z.P., Steele, K., Watts, N., Eckelman, M.J. (2021). Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England. *Lancet Planet Health*, 5, 84–92.
- [20] Yaman, C., "Emission Factors for Hospital Waste Management in Turkey," *Turkish Journal of Environmental Studies*, vol. 45, pp. 213-227, 2020.
- [21] Rizan, C., Bhutta, M.F., Reed, M., Lillywhiteet, R. (2021). Waste and Carbon Footprint of Healthcare Operations in the UK, *BMJ Global Health*, 6 (7), 987-999.
- [22] American Petroleum Institute (API). (2023). API TR 1533: Lubricants Life Cycle Assessment and Carbon Footprinting - Methodology and Best Practice [PDF dosyası]. *American Petroleum Institute*. Retrieved from: <https://www.api.org/-/media/files/certification/engine-oil-diesel/publications/api%20tr%201533.pdf>
- [23] Turkish Standards Institution (TSE). (2014). Measuring Instruments Regulation (2014/32/EU). Official Gazette, 21 June 2014.
- [24] Prasad, P.A., Joshi, D., Lighter, J., Agins, J., Allen R., Collins, M. (2022). Environmental footprint of regular and intensive inpatient care in a large US hospital. *Int J Life Cycle Assess*, 27(1), 38–49.
- [25] Wu, R. (2019). The carbon footprint of the Chinese health-care system: an environmentally extended input–output and structural path analysis study, *The Lancet Planetary Health* 3 (10), e413 - e419.
- [26] Sanz-Calcedo, J. (2019). Study of CO2 emissions from energy consumption in Spanish hospitals. *Vibroengineering PROCEDIA* 26, 20965.