

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ



e-ISSN 2147-9526

The Design and Technology Journal, which is part of the Gazi University Journal of Sciences family as Part C, aims to deliver the most up-to-date scientific and technological developments in engineering sciences to researchers, engineers and interested audiences. Our journal, which includes both experimental and theoretical studies in basic engineering fields, gives priority to the publication of articles related to the rapidly developing fields of engineering.

First published in 2013



2022, Volume 10, Issue 4 Content

1. Düşürücü-Yükseltici MPPT ve İki Yönlü Batarya Şarj Cihazı Kullanan Nötrosofik Bulanık Mantık Kontrol Tabanlı PMSM Hız Kontrolü (Araştırma Makalesi), Yücel ÇETİNCEVİZ, Fatih Emre BORAN, Page: 666-681
2. Determination of Total Antioxidant Capacities as Ascorbic Acid Equivalent of Tea Extract Samples from Different Brands Using Digital Image-Based Colorimetric Detection Method (Araştırma Makalesi), Ozan YAĞMUROĞLU, Page: 682-690
3. 7075 Al Alaşımına Uygulanan Kriyojenik ve Doğal Yaşlandırma İşleminin Avrami Parametresine Etkisi (Araştırma Makalesi), Gözde ALTUNTAŞ, Bülent BOSTAN, Page: 691-698
4. Investigation of Engineering Properties of Self-Compacting Concretes Produced with Different Mineral Additives (Araştırma Makalesi), Behcet DÜNDAR, Emriye ÇINAR RESULOĞULLARI, Page: 699-710
5. Üretim Planlama ve Kontrol Süreçlerinde Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanılması: Tekstil Sektöründe Bir Uygulama (Araştırma Makalesi), Aysel KOÇAK, Aytaç YILDIZ, Page: 711-732
6. Eklemeli İmalat Teknolojilerinde Kullanılan Biyomalzemeler ve Biyomedikal Uygulamaları (Derleme Makalesi), Cem ERTEK, Esra ÖZMEN, Page: 733-747
7. Diyarbakır Lice'de meydana gelen LPG tankeri kazasının fiziksel etkilerinin modellenmesi (Araştırma Makalesi), Saliha ÇETİNYOKUŞ, Ahmet DURMUŞ, Page: 748-764
8. Derin Öğrenme Yöntemleri İle Konuşmadan Duygu Tanıma Üzerine Bir Literatür Araştırması (Derleme Makalesi), Emrah DİKBİYİK, Önder DEMİR, Buket DOĞAN Page: 765-791
9. Sistematik Yaklaşımla Bir Konsept Tasarım Uygulaması: Engelli Dostu Spor Aleti (Araştırma Makalesi), Abdullah ÇELİK, C. Oktay AZELOĞLU, Page: 792-804
10. Gözenekli asfalt kaplamalarda ses yutma katsayısının modellenmesi: kalınlık ve karışım oranı örneği (Araştırma Makalesi), Tarık Serhat BOZKURT, Ahmet Sertaç KARAKAŞ, Page: 805-825
11. 2-Öğeli Tam Dilsel Sezgisel Bulanık Küme Yaklaşımı: Karar Verme Üzerine Bir Uygulama (Araştırma Makalesi), Gürkan IŞIK, Page: 826-840
12. Interval Valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging Operator Based On Multi-Criteria Decision Making Problems (Araştırma Makalesi), Şerif ÖZLÜ, Page: 841-857
13. Fire Safety Evaluation Of Dwellings In The Framework Of Regulation (Araştırma Makalesi), Hüseyin BAŞDEMİR, Page: 858-869
14. Al7075 Alaşımına İlave Edilen Al-5Ti-1B Tane İncelticinin Yaşlanma, Mikroyapı, Sertlik ve Korozif Özellikleri Üzerindeki Etkisi (Araştırma Makalesi), Engin KOCAMAN, Mete Berke YAMAN, Barış AVAR Page: 870-883
15. Akü Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi Ve Canbus Veri Trafığının İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Kubilay TAŞDELEN, Muhammet Ahmet KOYUNCU, Page: 884-894
16. Ön Karışimli Bir Yanma Odasında Metanın Yanma Karakteristiklerinin Renksiz Dağıtılmış Yanma Şartlarında Sayısal Olarak İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Çağrı TÜMER, Serhat KARYEYEN, Page: 895-924
17. Time-Dependent Petrol Station Replenishment Problem with Time Windows: A Real-Life Case in İstanbul (Araştırma Makalesi), Ertuğrul AYYILDIZ, Alev TAŞKIN GÜMÜŞ, Page: 925-939

18. Konutlardaki Elektrikli Cihazların Evrişimli Sınır Ağı ile Otomatik Sınıflandırılması (Araştırma Makalesi), Muzaffer ASLAN, Ebra Nur ZUREL, Zeynep Mine ALÇIN, **Page: 940-952**
19. Critical Aspects and Technology of Fixed Automated Spray Technology System (Araştırma Makalesi), Meral ÖZARSLAN YATAK, İsmet KILIÇ, Fecir DURAN **Page: 953-963**
20. Parmak Frezelerde Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi (Araştırma Makalesi), Bayram Sercan BAYRAM, İhsan KORKUT, **Page: 964-977**
21. Yüksek Karbonlu Toz Metalurjisi Çeliklerinin Su Verme ve Temperleme Davranışlarına Ham Yoğunluk Etkisinin İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Tolga YILMAZ, Dilan Zehra SEVİNDİROĞLU, Atakan SUVAY, **Page: 978-986**
22. Sprey Kaplama Yöntemi ile Üretilen Epoksi/SiO₂ Süperhidrofobik Kaplamaların Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi (Araştırma Makalesi), Ali Haydar GÜNEŞ, Sinan FİDAN, **Page: 987-1005**
23. Interval Valued q- Rung Orthopair Hesitant Fuzzy Choquet Aggregating Operators in Multi-Criteria Decision Making Problems (Araştırma Makalesi), Şerif ÖZLÜ, **Page: 1006-1025**
24. The Attitude of ZnO/Al₂O₃ Film Produced by Ultrasonic Spray Pyrolysis Under Thermal Annealing (Araştırma Makalesi), Meryem POLAT GÖNÜLLÜ, Damla Dilara ÇAKIL, Cemil ÇETİNKAYA, **Page: 1026-1036**
25. Beaulieu-Xie Gölgelemeli Sönümlü Kanallar İçin Efektif Kanal Kapasite İfadesinin Kuramsal Türetimi (Araştırma Makalesi), Yasin KABALCI, Mehmet BİLİM **Page: 1037-1045**
26. Filament sarım Bazalt / Epoksi kompozit boruların iç yüzey erozif aşınma davranışına partikül hızı ve çarpma açısının etkisi Türetimi (Araştırma Makalesi), Seyit Mehmet DEMET, Harun SEPETÇİOĞLU, Mehmet BAĞCI, **Page: 1046-1058**
27. Photoresponse of the Al/n-Si Schottky diode with nanorod ZnO interface layer prepared by hydrothermal method (Araştırma Makalesi), Neslihan TURAN, **Page: 1059-1069**
28. The Place and Importance of Artificial Intelligence in the Gastronomy Sector (Derleme Makalesi), Hatice TÜRKÖĞLU, Gül YILMAZ **Page: 1070-1082**
29. Design, Control and Automation of MHPP - An Experimental Setup (Araştırma Makalesi), Hüseyin ALTINKAYA, Fatih Mehmet ULU **Page: 1083-1097**
30. Lung Cancer Detection By Hybrid Learning Method Applying Smote Technique (Araştırma Makalesi), Alihan SUIÇMEZ, Çağrı SUIÇMEZ, Cengiz TEPE, **Page: 1098-1110**
31. İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi (Araştırma Makalesi), Elif Ece ELMAS, Mustafa ALKAN, **Page: 1111-1126**
32. Attentive Sequential Auto-Encoding Towards Unsupervised Object-centric Scene Modeling (Araştırma Makalesi), Ramazan Gökberk CİNBİŞ, Yarkin Deniz ÇETİN, **Page: 1127-1142**

Editor in Chief

Prof. Dr. Ahmet GÜRAL,
Gazi University

Assistant Editors

Assoc. Prof. Dr. Hanifi ÇİNİCİ
Gazi University
Asst. Prof. Dr. Onur ALTUNTAŞ
National Defense University

Technical Editors

Çağrı SUIÇMEZ, Gazi University
Ahmet ERDAĞ, Gazi University
Onur POLAT, Gazi University



(Alan Editörleri) Field Editors

Fatih Emre BORAN
Tuğba TABANLIGİL CALAM
Kadir GÜÇLÜER
Tuğba SARAÇ
Yunus Emre KARAKOCA.
Neşet AKAR
İsmail ÖZTÜRK
Burak ERKAYMAN

Şengül GÜVEN
Yunus DEMİR
Derya YILMAZ
Erdal IRMAK
Hüseyin POLAT
Mehmet DEMİRTAŞ
Volkan KILIÇLI
Sabri ÖZTÜRK

Gökhan DURMUŞ
Semra AYDIN
Cevdet Emin EKİNCİ
Alpay ÖZER
Fecir DURAN
Şengül GÜVEN
Murat MAYDA
Ersin DEMİR

Neutrosophic Fuzzy Logic Controller Based Speed Control of PMSM fed by Bidirectional Battery Charger with Buck-Boost MPPT

Erdal SEHİRLİ¹  Yücel ÇETİNCEVİZ^{1,*} 

¹ Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 37150, Merkez/KASTAMONU

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 14.02.2022

Revision: 19.03.2022

Accepted: 9.04.2022

Highlights

- Satate Of Charge.
- Neutrosophic Fuzzy Logic Control.
- Bidirectional Battery Charger.
- FOC.

Keywords

Neutrosophy
Permanent Magnet SM
MPPT
Battery charger

In this study, neutrosophic fuzzy logic controller based field oriented vector control of permanent magnet synchronous motor fed by photovoltaic panel and lithium battery through bidirectional battery charger is presented.

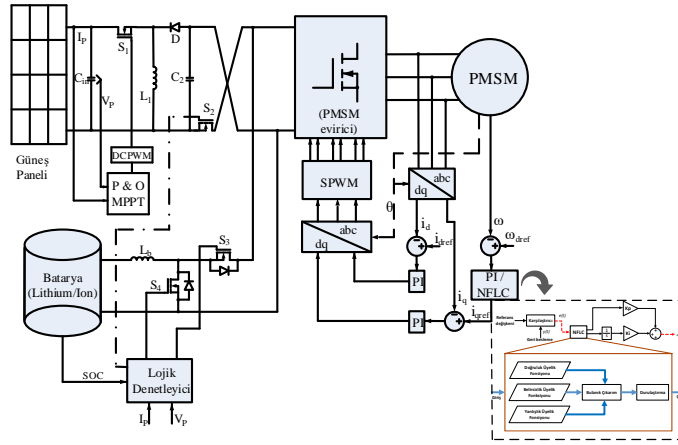


Figure A. Overall system block diagram with neutrosophic fuzzy logic speed controller

Purpose: The purpose of this study is to design neutrosophic fuzzy logic controller based on field oriented control in order to control the speed of PMSM fed by photovoltaic panel and lithium-ion batteries. While realizing the purpose, charge and discharge of the lithium-ion batteries are conducted by bidirectional battery charger.

Theory and Methods: In the presented system, neutrosophic fuzzy logic controller having fuzzy inference process for both error and change of error comparing to fuzzy logic, is added to traditional field-oriented speed control of PMSM in order to design neutrosophic fuzzy logic based speed controller. Furthermore, PMSM is fed by photovoltaic panel and lithium-ion battery. Also, photovoltaic energy is transferred by using buck boost converter based MPPT having perturb and observe algorithm. In addition, by using bidirectional converter controlled via logic controller operated with respect to state of charge of battery and solar irradiation, charge and discharge of lithium-ion battery is realized. Presented system is implemented by using simulation study. Moreover, neutrosophic based speed controller is compared by traditional PI speed controller to show the differences.

Results: By means of the simulation study as a result, neutrosophic fuzzy logic based speed controller of the PMSM has maximum 0.00785s settling time, ± 0.18 rad/s steady state error. In addition, PI based speed controller has maximum 0.072s settling time, ± 0.34 rad/s steady state error. Moreover, fast transition of the bidirectional battery charger is provided in order to charge or discharge the lithium-ion battery.

Conclusion: In this paper, neutrosophic fuzzy logic based field oriented speed control of PMSM is realized. Also, PMSM is fed by photovoltaic panel and lithium-ion battery. Photovoltaic panel has buck boost converter based MPPT using perturb and observe algorithm and lithium-ion battery has bidirectional battery charger. It is shown that seamless operation of the system is provided. Besides, it is concluded that neutrosophic speed controller designed in the study gives better characteristics than traditional PI controller. Also, fast transition between charge and discharge operation of the bidirectional battery charger is obtained.



Neutrosophic Fuzzy Logic Controller Based Speed Control of PMSM fed by Bidirectional Battery Charger with Buck-Boost MPPT

Erdal SEHİRLİ¹ Yücel ÇETİNCEVİZ^{1,*}

¹Kastamonu Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 37150, Merkez/KASTAMONU

Abstract

In this paper, neutrosophic fuzzy logic is employed for vector control-based speed control of permanent magnet synchronous machine fed by photovoltaic panel and lithium battery. Maximum power transfer from photovoltaic panel to synchronous machine and battery is achieved by maximum power point tracker based on buck-boost converter with perturb&observe control. Battery is charged and discharged by bidirectional battery charger. Proportional-integral controller is preferred for the control of voltage and current at charging duration and voltage at discharging duration. Operation of bidirectional battery charger is carried out by logic controller depends on state of charge of battery and irradiation level of photovoltaic energy. Thanks to the simulations, speed of permanent magnet synchronous motor under reference and load change, photovoltaic and battery power under irradiation level and ambient temperature change are measured and shown. As a result, overall system operates perfectly. It constitutes a good alternative for water pumping, electrical and naval applications.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14.02.2022
Düzeltilme: 19.03.2022
Kabul: 9.04.2022

Keywords

Neutrosophy
Permanent Magnet SM
MPPT
Battery charger

Anahtar Kelimeler

Nötrosofi
Kalıcı Mıknatıslı SM
MPPT
Batarya Şarj

Düşürücü-Yükseltici MPPT ve İki Yönlü Batarya Şarj Cihazı Kullanan Nötrosifik Bulanık Mantık Kontrol Tabanlı PMSM Hız Kontrolü

Öz

Bu çalışmada, fotovoltaiik panel ve lithium batarya beslemeli vektör kontrol tabanlı sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolü için nötrosifik bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Fotovoltaiik panelden sabit mıknatıslı senkron motor ve bataryaya maksimum güç aktarımı, değiştir&gözle kontrollü düşürücü-yükseltici dönüştürücü tabanlı maksimum güç noktası takip edici ile gerçekleştirilmiştir. Batarya, iki yönlü batarya şarj edici üzerinden şarj ve deşarj edilmiştir. Şarj esnasında akımın ve gerilimin, deşarj esnasında gerilimin kontrol için oransal-integral kontrol edici tercih edilmiştir. İki yönlü batarya şarj edicinin çalışması, bataryanın şarj durumu ve güneş enerjisi aydınlanma şiddetine bağlı olan lojik denetleyici üzerinden gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sayesinde, referans ve yük değişimi altında sabit mıknatıslı senkron motorun hızı, aydınlanma şiddeti ve ortam sıcaklığı değişimi altında fotovoltaiik ve batarya gücü, ölçülmüş ve gösterilmiştir. Sonuç olarak, sistemin tamamı mükemmel şekilde çalışmaktadır. Su pompalama, elektrikli ve deniz araçları uygulamaları için iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, yenilenebilir enerji kaynakları kullanımı, karbon tabanlı kaynakların çevreye olumsuz etkileri ve azalmaları sebebiyle oldukça cazip hale gelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi önemli yer tutar. Güneş enerjisinin elektrik enerjisine dönüşümü nispeten rüzgâr enerjisine göre daha kolaydır. Bu dönüşüm, güneş panelleri kullanarak gerçekleştirilir ve dönüşüm sonucunda doğru akım (DA) enerjisi elde edilir. Ancak gerek güneş gerekse rüzgâr enerjisi doğrudan güneş ve rüzgâra bağlı oldukları için anlık olarak değişebilmektedirler. Günün her saati sürekli aynı seviyede bir enerji dönüşümü sağlanamaz ve bu durumdan bağlı olan yük olumsuz şekilde etkilenir. Bu nedenle, bir enerji depolama birimine ihtiyaç duyulmaktadır. Enerji depolama birimi genellikle bataryalar üzerinden gerçekleştirilir ve son yıllarda en yüksek verimi lityum tabanlı bataryaların sağladığı belirtilmektedir.

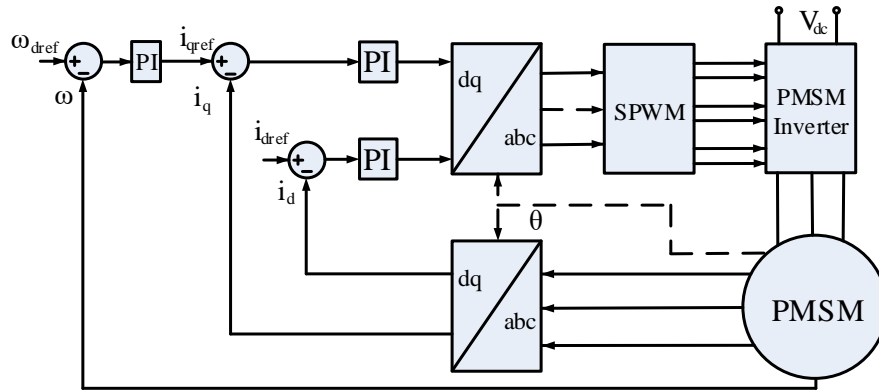
Bataryalar sayesinde, güneş enerjisi mevcut olduğunda batarya şarj edilir, aynı zamanda da batarya üzerinden yük beslenir. Güneş enerjisi yeteri kadar bulunmadığı durumlarda, batarya yükü beslemeye devam eder. Böyle bir çalışmanın sağlanabilmesi için bir güç elektroniği dönüştürücüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dönüştürücü iki yönlü güç akışını gerçekleştirebilecek yapıda olmalıdır. Güneş enerjisinin maksimum seviyede dönüştürülebilmesini sağlamak amacıyla bir maksimum güç takibi (MPPT) yöntemi herhangi bir DA dönüştürücü üzerinden gerçekleştirilir. DA dönüştürücüler, anahtarlanan yarı iletkenleri içeren, gerilimi düşüren veya yükselten elektronik devrelerdir [1]. Diğer yandan, elektrik enerjisi mekanik enerjiye elektrik motorları vasıtasıyla dönüştürülür. Şebekeden uzak, kırsal yerlerde ya da hava, deniz ve elektrikli araçlarda mekanik enerji sağlanabilmesi için motorlara ihtiyaç duyulur. Elektrikli motorların verimleri, benzinli ve dizel motorlardan yüksek olduğu için son yıllarda bu tip uygulamalarda daha çok tercih edilmektedirler. Ek olarak, düşük atalet momenti, yüksek moment-akım oranı ve yüksek güç yoğunluğu gibi özelliklere sahip olmaları nedeniyle kalıcı mıknatıslı senkron motor (Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)) elektrik motoru diğer motorlara göre daha çok tercih edilmektedirler.

Literatürde bu konu ile ilgili yapılmış bazı çalışmalar; [2-4]'de PMSM'nin yapısı, çalışması ve denetimi detaylı olarak incelenmiştir. PMSM'nin güneş enerjili ve MPPT'li sistemde su pompalama amacıyla kullanılmasını içeren uygulama sensörlü olarak [5-8] de, sensörsüz olarak [9] de, soğutma ünitesi olarak kullanıldığı uygulama [10] da gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda MPPT dönüştürücüsü olarak yükseltici veya yarı-rezonans dönüştürücü, değiştir&gözle (perturb&observe(P&O)) veya artırılmış iletkenlik MPPT yöntemi ile kullanılmıştır. [11-13] de ise, güneş enerjili MPPT'li PMSM su pompalama sistemi ile şebeke bağlantısı olan uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Benzer sistemler şebeke bağlantısı olmaksızın, [14] de asenkron motor ile [15-16] de anahtarlamalı relüktans motorla ve [17] da fırçasız DC motor ile birlikte uygulanmıştır. MPPT dönüştürücüsü olarak, ZETA ve SEPIC dönüştürücülerinin de kullanıldığı benzer uygulamalar [18-19] de gerçekleştirilmiştir. [20-22] de güneş enerjisi ve MPPT yapılarının bulunmadığı, elektrikli araçlar için, lityum (Li)/ iyon (Ion) bataryaların ve [23] de hidrojen enerjinin de PMSM ile birlikte kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Batarya şarj edici yapıları genel olarak [24] de ve iki yönlü dönüştürücü kullanan batarya şarj edici uygulamaları şebeke etkileşimli olarak [25] de ve güneş enerjisi ile birlikte [26] de gerçekleştirilmiştir. [27] PMSM'nin oransal-integral-türevsel (Proportional Integral Derivative (PID)) bulanık mantık hız denetimini, [28] vektör kontrolünü gerçekleştirir. PMSM kayıcı kipli hız denetimi [29]' de yapılmıştır.

Bu çalışmada, güneş enerjisi ile beslenen PMSM motorunun hız kontrolü, nötrosofik bulanık denetim içeren vektör kontrol yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisi, P&O algoritmasına sahip düşürücü-yükseltici MPPT ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Depolama birimi olarak da Li/Ion batarya sistemi kullanılmıştır. Batarya, sisteme iki yönlü güç batarya şarj cihazı üzerinden bağlanmıştır. İki yönlü batarya şarj cihazı, şarj durumunda hem akım hem de gerilim denetleyicilerinden, deşarj durumunda sadece gerilim denetleyicisinden oluşmaktadır. Bununla birlikte, bir lojik denetleyici iki yönlü batarya şarj cihazının çalışma moduna karar verir. Bu lojik denetleyici bataryanın bataryanın şarj durumu (Satate Of Charge (SOC)) değerine ve aydınlanma şiddeti değerine göre karar verir. Uygulama Matlab/Simulink programı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmaları yapılırken, PMSM referans hızı, yükü ve güneş panellerinin aydınlanma şiddeti, ortam sıcaklık değerleri değiştirilmiştir. Benzetimler üzerinden, PMSM hızı, güneş panelleri ve batarya üzerinden sisteme aktarılan enerji seviyeleri gösterilmiştir. Benzetimler ile bu çalışmada önerilen yapının mükemmel şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Önerilen yapı, kırsal alanlarda su pompalama sistemlerin de elektrikli hava, kara ve deniz taşıtlarında kullanılabileceği öngörülmektedir.

2. PMSM HIZ KONTROLÜ (PMSM SPEED CONTROL)

Son yıllarda, yüksek verim, düşük atalet momenti, yüksek moment-akım oranı ve yüksek güç yoğunluğu gibi avantajları nedeniyle PMSM kullanımı cazip hale gelmiştir. PMSM'nin hız kontrolünde genellikle doğrudan moment kontrolü (DMC) ya da alan uyarlamalı kontrol (AUK) yöntemleri tercih edilmektedir. DMC yönteminde akı ve momentin tahmin edilmesi gerekliliğinden dolayı nispeten daha karmaşıktır. Bu nedenle, bu çalışmada AUK yöntemi tercih edilmiştir. AUK'ya ait prensip şeması Şekil 1 de verilmiştir [2-4, 28].



Şekil 1. PMSM'nin AUK kontrolü

Şekil 1'den de görüleceği gibi, AUK yönteminde, hız referansı motor hızı ile karşılaştırılır. Elde edilen hata sinyali ve oransal-integral (Proportional Integral (PI)) denetleyici kullanılarak referans q eksenini akımı i_{qref} elde edilir. PMSM'nin çektiği üç fazlı akımlar, dq-abc dönüşümü üzerinden, dq eksenine dönüştürülür. Elde edilen q eksenini akımı, i_{qref} ile karşılaştırılır. Diğer yandan, elde edilen d eksenini akımı i_d , referans d eksenini akımı (i_{dref}) ile karşılaştırılır. Elde edilen sonuçlar PI denetleyiciler kullanılmak suretiyle, referans d-q büyüklükleri elde edilir ve abc eksenine dönüştürülür. Daha sonra, SPWM yöntemi kullanılarak, PMSM eviricisinde bulunan altı adet güç anahtarı için gerekli olan PWM sinyalleri elde edilir. Eksen dönüşümleri, abc-dq ve dq-abc için gerekli olan θ açısı, PMSM hızının türevi ya da rotor pozisyonu üzerinden elde edilir. PMSM'nin rotor referans düzleminde dq eksen stator gerilim ve moment eşitlikleri akı bağı (1-3) ile ifade edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak, hız denetleme yapısı elde edilir [2-4, 28].

$$V_{qs}^r = \frac{R_s}{L_s} \lambda_{qs}^r + p \lambda_{qs}^r + \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (1)$$

$$V_{ds}^r = \frac{R_s}{L_s} (\lambda_{ds}^r - \lambda_{af}) + p \lambda_{ds}^r - \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r] \quad (3)$$

Burada, r indisi rotor referans düzlemini, V_{qs}^r , V_{ds}^r , i_{qs}^r , i_{ds}^r , λ_{qs}^r , λ_{ds}^r , λ_{af} sırasıyla stator gerilimlerini, stator akımlarını, stator akılarını ve rotor kalıcı mıknatıs akısını ifade eder. R_s stator sargısı direncini, L_s stator kaçak endüktansını, p çift kutup sayısını, ω_r rotorun elektriksel açısal hızını ve T_e elektromanyetik momenti ifade eder.

3. NÖTROSOFİK BULANIK MANTIK KONTROL (NEUTROSOPHIC FUZZY LOGIC CONTROL)

Nötrosofi, insan zihnine daha yakındır, çünkü insan zihni gibi, çeşitli gözlemcilerden aldığı bilgilerin belirsizliğini veya dilsel yanlışlığını yakalar. Belirsizlik, eksik bilgi, edinme hataları veya rastgelelikten kaynaklanabilir. Bu bölümde bulanık mantığın işleyemeyeceği belirsizliği ve insan beynine daha yakın yorumları sunan nötrosofik mantık tanıtılmıştır. Aşağıda nötrosofik mantığın temelini oluşturan kümenin tanımı verilmiştir.

Tanım 3.1 [28]: X , bir evrensel küme olsun. x , X de bir elemandır. A , X 'in bir nötrosofik alt kümesidir. $A = \{ \langle x, \tau_A(x), \beta_A(x), \varphi_A(x) \rangle : x \in X \}$ 'nin üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibidir:

- $\tau_A(x): X \rightarrow]0^-, 1^+[$ (Doğruluk-üyelik fonksiyonu),
- $\beta_A(x): X \rightarrow]0^-, 1^+[$ (Belirsizlik-üyelik fonksiyonu),
- $\varphi_A(x): X \rightarrow]0^-, 1^+[$ (Yanlışlık-üyelik fonksiyonu),

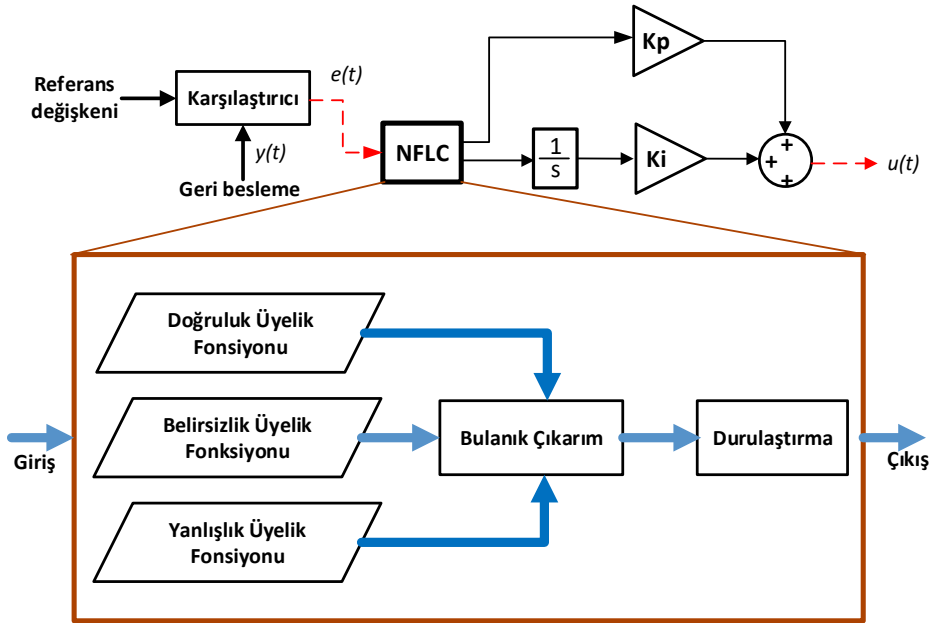
Üyelik fonksiyonlarının toplamında herhangi bir kısıtlama yoktur, bu yüzden

$$0^- \leq \sup \tau_A(x) + \sup \beta_A(x) + \sup \varphi_A(x) \leq 3^+$$

dir.

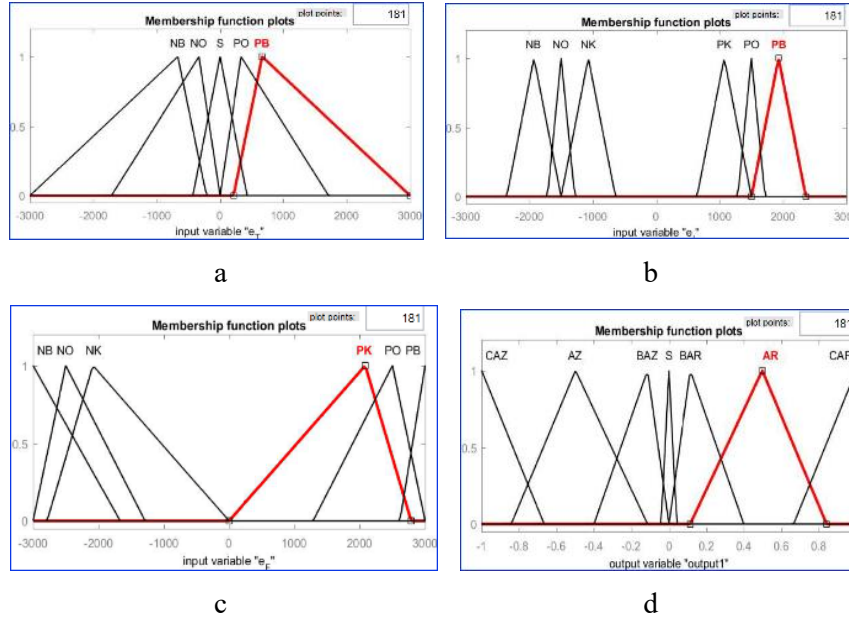
Nötrosofik sınıflandırıcı: sınıflandırma için nötrosofik mantık ilkelerini ve nötrosofik kümeleri kullanan bir sınıflandırıcıdır. Bu çalışmada nötrosofik sınıflandırıcı, Matlab kullanılarak tasarlanmıştır. Nötrosofik sınıflandırıcı, matematiksel olarak bulanık sınıflandırıcıya benzer bir sistemi modellemeye çalışmak yerine problemi çözmek için "if x ve y then z" gibi nötrosofik kural tabanlı bir yaklaşım içerir. Oluşturulan sonuçta doğruluk, yanlışlık ve belirsizlik oranının bulunduğu uygulamalar için nötrosofik mantık kullanarak kodlamanın gerekli olduğu kavramının anlaşılmasına göre düzenlenmiştir. Bulanık metodoloji kullanılarak nötrosofik sınıflandırma çıkarım sisteminin tasarımı Mamdani bulanık çıkarım yönteminin ilkelerine dayanmaktadır. Günümüzde mevcut durumda nötrosofi mantığını destekleyen herhangi bir yazılım mevcut değildir, bu nedenle önerilen çalışma Matlab'ın bulanık mantık araç kutusu üzerinde uygulanmıştır.

Kullanılan bulanık sınıflandırıcılar ile üyelik fonksiyonlarının doğası, kural sayısı ve üretilen sonuçlardaki belirsizlik gibi parametreler üzerinden karşılaştırılır. Nötrosofik sınıflandırıcı, bahsi geçen parametreleri bulanık eş değeri ile karşılaştırarak optimize eder. Şekil 2, Matlab'ın bulanık mantık araç kutusunu kullanan bir nötrosofik sınıflandırma sisteminin blok diyagram temsilini verir. NFLC yönteminde hata ve hatadaki değişim iki ayrı bulanık çıkarım biriminde ele alınmıştır. Önerilen yöntem, bulanık-PI kontrolü ve nötrosofik küme yaklaşımı ile değerlendirilerek oluşturulmuştur. İki ayrı bulanık çıkarım sisteminde (FIS) 'e' ve 'ce'yi değerlendirmek için nötrosofik üyeler kullanılarak daha ayrıntılı bir hata değerlendirmesi sağlanmıştır.



Şekil 2. NFLC nin blok diyagramı

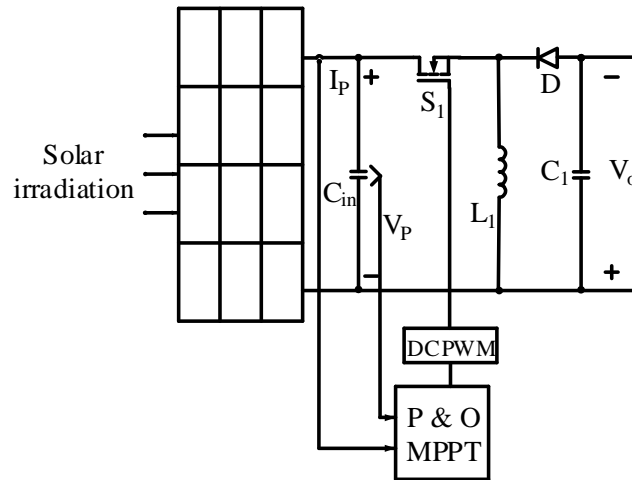
τ , β ve φ nötrosofik bileşenlerinin değerleri birbirinden bağımsızdır. Böylece Matlab'ın bulanık mantık araç kutusu kullanılarak üç bulanık çıkarım sistemi (FIS) tasarlanmıştır: biri nötrosofik doğruluk bileşeni için, ikincisi nötrosofik belirsizlik bileşeni için ve üçüncüsü nötrosofik yanlışlık bileşeni içindir, Şekil 3 de gösterilmiştir. Bu bileşenlerin çalışması birbirinden bağımsız olmasına rağmen, girdi ve çıktının doğruluğunu, belirsizliğini ve yanlışlığını yakalamak için nötrosofik τ , β ve φ bileşenlerinin üyelik fonksiyonları arasında bir korelasyon elde edilir.



Şekil 3. NFLC de kullanılan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları: (a) τ MF, (b) β MF, (c) φ MF, (d) çıkış MFs

4. DÜŞÜRÜCÜ-YÜKSELTİCİ MPPT (BUCK-BOOST MPPT)

Güneş panellerinden maksimum gücün çekilebilmesi için, herhangi bir MPPT yönteminin kullanılması gereklidir. MPPT bir DA-DA dönüştürücü vasıtasıyla uygulanabilmektedir. Literatürde genellikle dönüştürücü olarak yükseltici tip dönüştürücü kullanılmaktadır [31]. Ancak, yükseltici dönüştürücü de çıkış gerilimi sadece giriş geriliminden yüksek olarak elde edilmektedir. Bununla birlikte, düşürücü-yükseltici dönüştürücü vasıtasıyla çıkış gerilimi giriş geriliminden daha düşük ya da daha yüksek olarak elde edilebilmektedir. Şekil 4 de güneş panellerine bağlanmış olan düşürücü-yükseltici dönüştürücü gösterilmektedir. Görüleceği gibi, bu dönüştürücü bir adet bobin ve kondansatör, güç anahtarı ve diyottan oluşmaktadır. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüde bir dezavantaj olarak nitelendirilen durum, çıkış gerilimi polaritesinin giriş gerilimi polaritesine göre ters oluşudur [32].



Şekil 4. Düşürücü-yükseltici MPPT

Düşürücü-yükseltici dönüştürücünü pasif elemanları olan endüktans L ve filtre kapasitansı C 'nin değerleri (4-5) ile tespit edilir[29]. Burada R direnci, D görev döngüsünü (duty cycle), f_{sw} anahtarlama frekansını, V_o çıkış gerilimini, ΔV_c kontrol gerilimindeki dalgalanmayı ifade eder.

$$L_1 = \frac{R(1-D)^2}{2f_{sw}} \quad (4)$$

$$C_1 = \frac{DV_o}{f_{sw}R\Delta V_c} \quad (5)$$

Şekil 4. de görüleceği gibi, düşürücü-yükseltici dönüştürücünün güç anahtarı S_1 e uygulanacak PWM sinyali, P&O tabanlı MPPT üzerinden DCPWM tekniği kullanılarak elde edilmiştir. P&O yöntemini uygulamak için, güneş paneli akımı (I_p) ve gerilimi (V_p) nin ölçülmesi gereklidir. P&O yapısı ile DCPWM bloğuna uygulanacak olan kontrol gerilimi (V_c) ayarlanmaktadır, V_c ' nin nasıl ayarlandığı ise (6-9) ile verilmiştir [11, 16, 19].

$$dP \ \& \ dV > 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi arttır} \ (6)$$

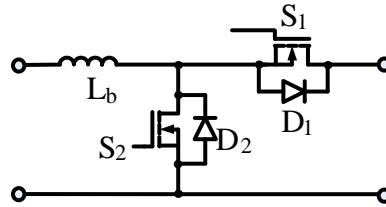
$$dP > \& \ dV < 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi azalt} \ (7)$$

$$dP < 0, \ dV < 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi azalt} \ (8)$$

$$dP < 0, \ dV > 0 \rightarrow V_c \text{ 'yi arttır} \ (9)$$

5. İKİ YÖNLÜ BATARYA ŞARJ EDİCİ (TWO-WAY BATTERY CHARGER)

Güneş enerjisi ışınım şiddetine bağlı olarak değiştiği için, enerji güvenilirliği sağlanması ve PMSM'nin sürekli olarak enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla batarya gibi bir depolama elemanına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılacak olan batarya elemanı, ışınım şiddeti yüksek olduğunda şarj, düşük olduğunda deşarjı sağlaması gerekmektedir. Bu işlemin yapılabilmesi için bir güç elektroniği dönüştürücüsüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bu dönüştürücü enerjiyi iki yönlü aktarabilme özelliğine sahip olmalıdır. Şekil 5'te bu çalışmada kullanılan iki yönlü batarya şarj edici yapısı gösterilmektedir [19, 24-26].

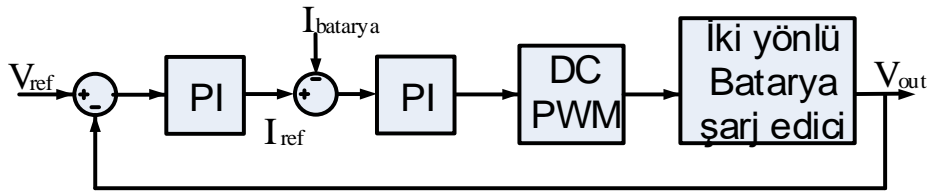


Şekil 5. İki yönlü batarya şarj edici

Şekil 5'ten görüleceği gibi, iki yönlü batarya şarj edici iki adet güç anahtarı (S_1 , S_2) ve bunlara paralel iki adet diyot (D_1 , D_2), bir adet bobinden (L_b) oluşmaktadır. Bataryanın şarj edilebilmesi için, iki yönlü şarj edicinin düşürücü modunda çalıştırılması gereklidir. Bu mod için, S_1 anahtarı iletimde iken, S_2 anahtarı kesimde tutulur ve paralel bağlı D_2 diyotu iletime geçer. Bataryanın deşarj edilip, PMSM'nin beslenmesi için, iki yönlü batarya şarj edici yükseltici modunda çalıştırılır. Bu modda, S_2 anahtarı iletime geçirilip, S_1 anahtarı kesimde tutulmaktadır ve S_1 anahtarı yerine paralel bağlı D_1 diyotu iletimde olmaktadır. İki yönlü şarj edicinin L_b bobini değeri (10) ile bulunur.

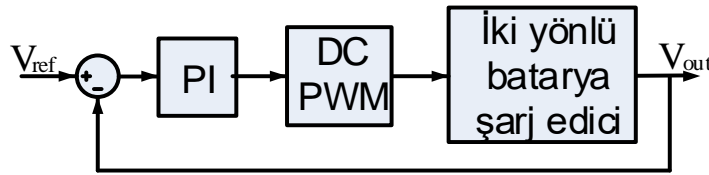
$$L_b = \frac{D(V_i - V_o)}{2\Delta I_{L_b} f_{sw}} \quad (10)$$

İki yönlü şarj edicinin denetimi, düşürücü ve yükseltici çalışma durumlarına göre farklı iki yapıda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6 da, düşürücü durumu denetimi için blok diyagramı gösterilmiştir. Bu denetimde hem akım hem de gerilim kontrol döngüleri bulunmaktadır. Denetimde öncelikle referans gerilim (V_{ref}) ile batarya gerilimi (V_{out}) karşılaştırılır ve PI denetleyici üzerinden referans akım (I_{ref}) elde edilir. I_{ref} , batarya akımı ($I_{batarya}$) ile karşılaştırılır ve ikinci bir PI denetleyici kullanılarak DCPWM için kontrol gerilimi elde edilir. DCPWM bloğu ile PWM sinyali üretilerek, iki yönlü batarya şarj edicinin S_1 anahtarına uygulanır.



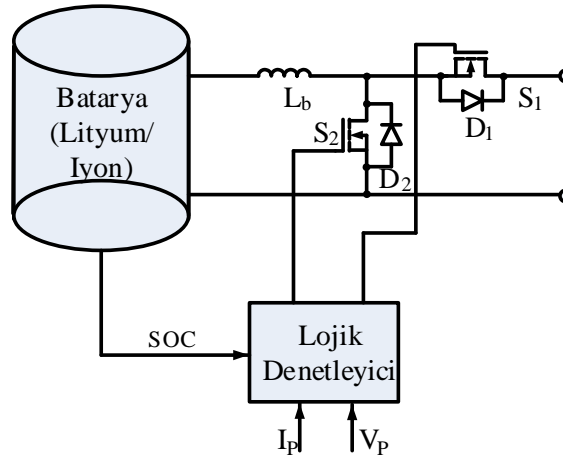
Şekil 6. İki yönlü batarya şarj edici düşürücü mod denetimi

Şekil 7 de, iki yönlü batarya şarj edicinin yükseltici çalışma durumu için gerekli olan denetim yapısı gösterilmektedir. Bu denetimde sadece gerilim kontrol döngüsü bulunmaktadır. Denetimde, referans gerilim (V_{ref}) ile çıkış gerilimi (V_{out}) karşılaştırılır ve PI denetleyici üzerinden kontrol gerilimi elde edilir, kontrol gerilimi DCPWM bloğuna uygulanarak, iki yönlü batarya şarj edicinin S_1 anahtarına uygulanacak olan PWM sinyali üretilir [19, 24-26].



Şekil 7. İki yönlü batarya şarj edici yükseltici mod denetimi

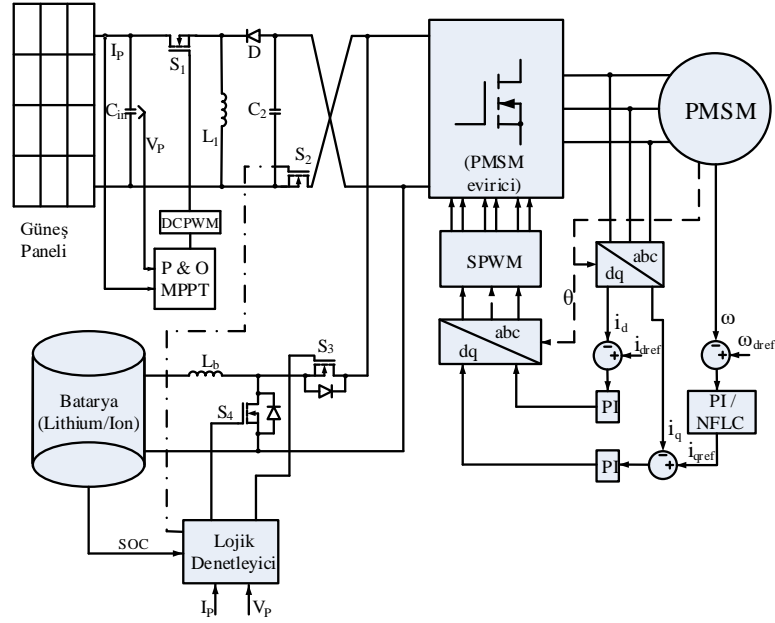
Ayrıca, iki yönlü batarya şarj edicinin hangi modda çalışacağı, bataryanın, SOC değeri ve güneş panelinin aydınlanma şiddeti değerine göre, lojik denetleyici üzerinden belirlenmektedir. Şekil 8 de Li/Ion bataryanın sisteme bağlantısı gösterilmektedir.



Şekil 8. Li/Ion bataryanın sisteme bağlantısı

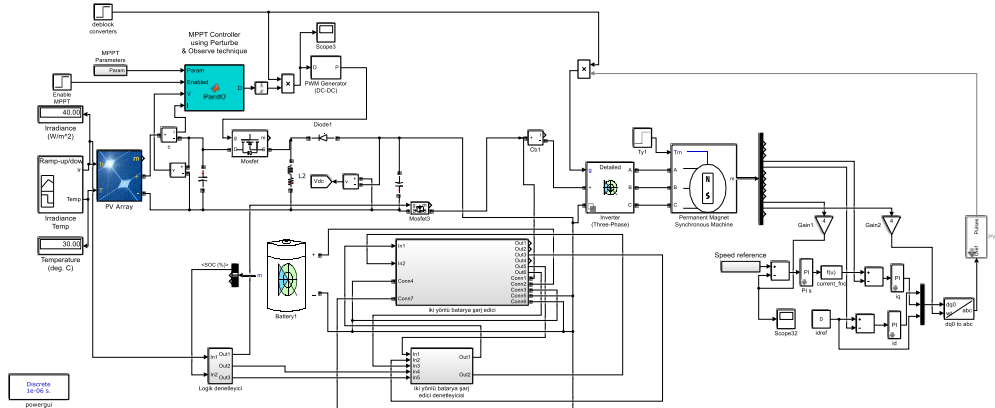
6. BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY)

Bu çalışma Matlab/Simulink üzerinden benzetim olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 da benzetim blok diyagramı gösterilmektedir. Güneş paneli sisteme düşürücü-yükseltici MPPT üzerinden bağlanmıştır. Li/Ion batarya iki yönlü batarya şarj cihazı üzerinden, düşürücü-yükseltici dönüştürücü çıkışına ve PMSM eviricisine bağlanmıştır. Ek olarak, düşürücü-yükseltici dönüştürücü çıkışına S_2 anahtarı yerleştirilerek, güneş enerjisi olmadığı durumlarda bataryanın enerjisinin, güneş paneli tarafından çekilme olasılığı engellenmiştir. S_2 anahtarı da lojik denetleyici üzerinden denetlenmektedir. Lojik denetleyici, yeterli güneş enerjisi olduğunda ve bataryanın SOC değeri %80'in altında olduğunda, iki yönlü batarya şarj ediciyi şarj modunda çalışmasını sağlar. Benzer şekilde, yeterli güneş enerjisi olmadığı ve bataryanın SOC değeri %10 olana kadar, iki yönlü batarya şarj ediciyi deşarj modunda çalıştırır. İlaveten, PMSM hız denetimi için nötrosofy bulanık denetleyici ve PI denetleyici tabanlı vektör denetim ayrı ayrı kullanılmış ve karşılaştırılmıştır.



Şekil 9. Benzetimin blok diyagramı

Benzetimin blok diyagramına ait simülasyon şeması Şekil 10 da verildiği gibidir.



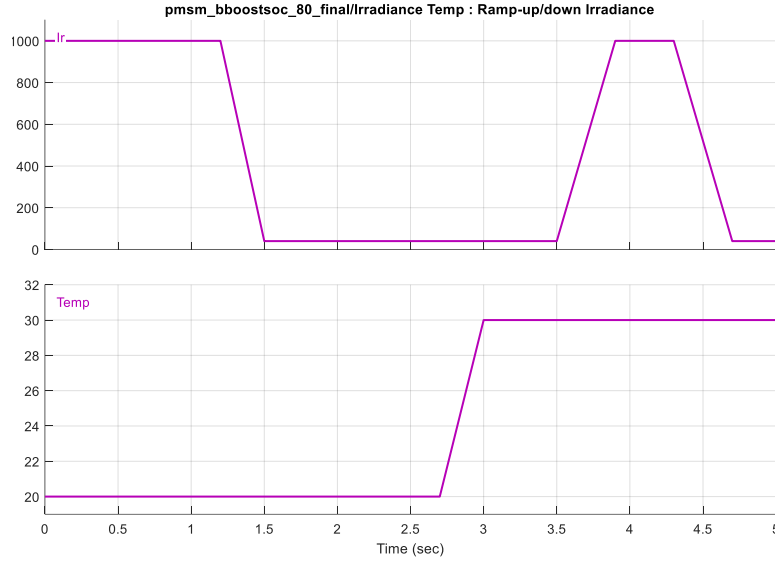
Şekil 10. Benzetim devresi

Benzetim çalışmalarında kullanılan elemanların değerleri Tablo 1 de verilmektedir.

Tablo 1. Benzetim çalışmalarında kullanılan eleman değerleri

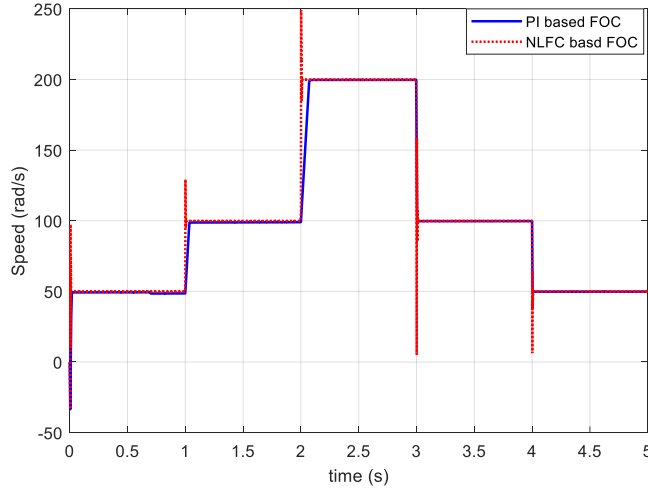
| Benzetimde Kullanılan Eleman Değerleri | | | | | | | | | |
|--|---------------|---------|----------|------------------------------|----------|------------|---------|--------------|--------------|
| PMSM | | PV | | İki Yönlü Batarya Şarj Edici | | | | | |
| PI Hız | | PI Akım | | Güç | Gerilim | L | | C | |
| K_p | K_I | K_p | K_I | 305.2W | 64.2V | 5mH | | 1000 μ F | |
| 5 | 1 | 6 | 1 | Seri | Paralel | PI Deşarj. | | PI Şarj. | |
| Sargı direnci (Ω) | Endüktans (H) | | 1 | 40 | K_p | K_p | Gerilim | Akım | |
| 0.0485 | 0.000395 | | MPPT | | 0.005 | 0.001 | K_p | K_p | K_p K_p |
| Akı (V.s) | Kutup Sayısı | | L | C | | | 1.5 | 0.001 | 0.0065 0.001 |
| 0.1194 | 4 | | 5mH | 1000 μ F | f_{sw} | 50kHz | | | |
| An. Frek. | 5kHz | | f_{sw} | 120kHz | | | | | |

Benzetimler aydınlanma şiddeti ve panelin ortam sıcaklığı değişimleri altında gerçekleştirilmiştir. Bu değişimler, Şekil 11'de gösterildiği gibidir. $t=0-1.2s$ arasında, aydınlanma şiddeti $100W/m^2$ dir, $t=1.5-3.5s$ arasında ise $40 w/m^2$ ye düşmüştür. $t=3.9-4.3s$ arasında tekrar $100W/m^2$ ve $t=4.7-5s$ arasında da $40 w/m^2$ dir. Benzer şekilde ortam sıcaklığı da $t=0-2.6s$ arasında, $20^{\circ}C$, $t=3-5s$ arasında ise $30^{\circ}C$ yükselmiştir.



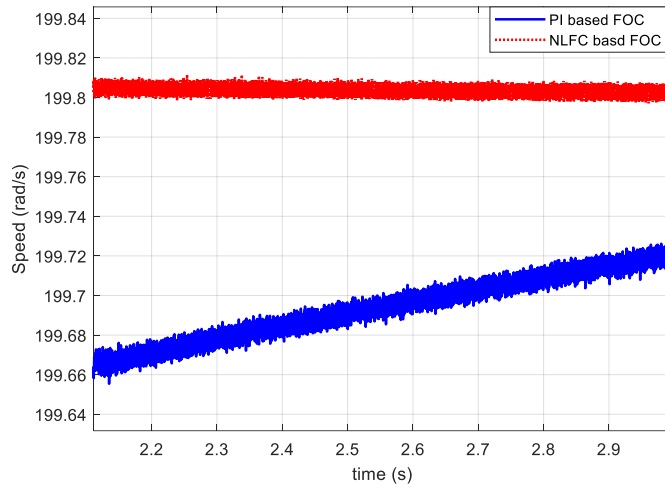
Şekil 11. Panel aydınlanma şiddeti ve ortam sıcaklığı değişimi

Li/Ion bataryanın farklı SOC değeri için benzetimler gerçekleştirilmiştir. Burada, SOC değeri %80'ne yakın durum için yapılan benzetimlere yer verilmiştir. Bu simülasyonlar sonucunda, PMSM hızı, referans değişimleri altında Şekil 12 de ki gibi gösterilmektedir. Görüleceği gibi, hız $t=0$ da $50rad/sn$, $t=1$ de $100 rad/sn$, $t=2$ de $200rad/s$, $t=3$ de $100rad/sn$, $t=4$ de $50rad/sn$ şeklinde değiştirilmiş ve istenilen hız değeri denetleyici sayesinde sağlanabilmiştir. Ek olarak, motor momenti, $t=0.75sn$ de, $4.5Nm$ den $9Nm$ ye arttırılmıştır. Ayrıca oturma zamanı maksimum $0.072sn$ dir.



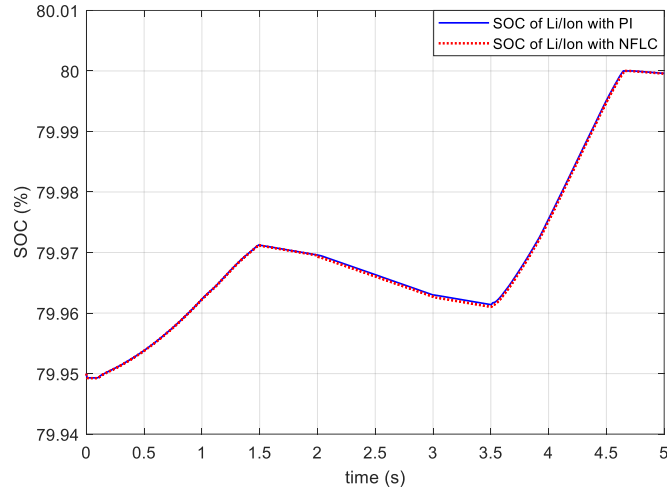
Şekil 12. PMSM Hızı

Şekil 13 de, hızın kararlı durum hatasını tespit edebilmek için, Şekil 12 nin yakınlaştırılmış hali gösterilmiştir. Kararlı durum hatası, görüleceği gibi $200 rad/s$ hız için PI denetimde -0.34 olarak, NLFC için -0.18 olarak gerçekleşmiştir.



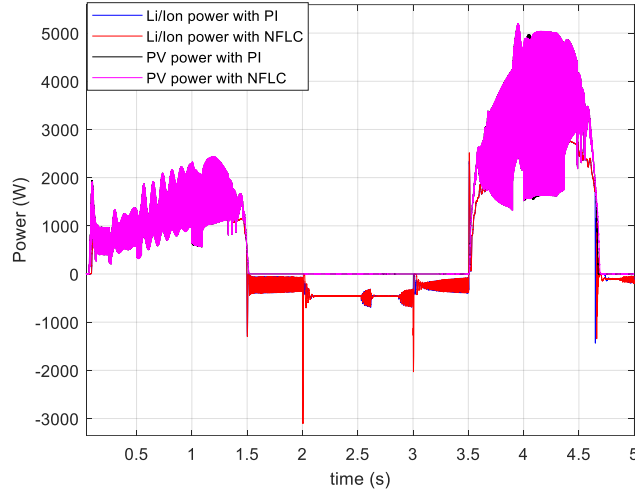
Şekil 13. PMSM Hızı kararlı durum hatası

Li/Ion bataryanın SOC değişimi Şekil 14 de gösterilmektedir. Yeterli güneş enerjisi olduğunda, batarya şarj olmaktadır ve SOC değeri 0-1.2s kadar artmıştır. Daha sonra, Şekil 11 de ki aydınlanma şiddetine göre, aydınlanma şiddeti azaldığı için, batarya deşarj olmaya başlamış ve 3.5sn kadar deşarj olmuştur. 3.5 s den itibaren, yeterli güneş enerjisi olduğu için, batarya şarj olmaya başlamıştır. SOC değeri, 4.5sn de, %80'ne ulaştığında, lojik kontrolör bataryanın şarj olmasını engellemiştir. Daha sonra, güneş enerjisi azaldığı için, batarya deşarj olmaya başlamış ve motora güç aktarmaya devam etmiştir.



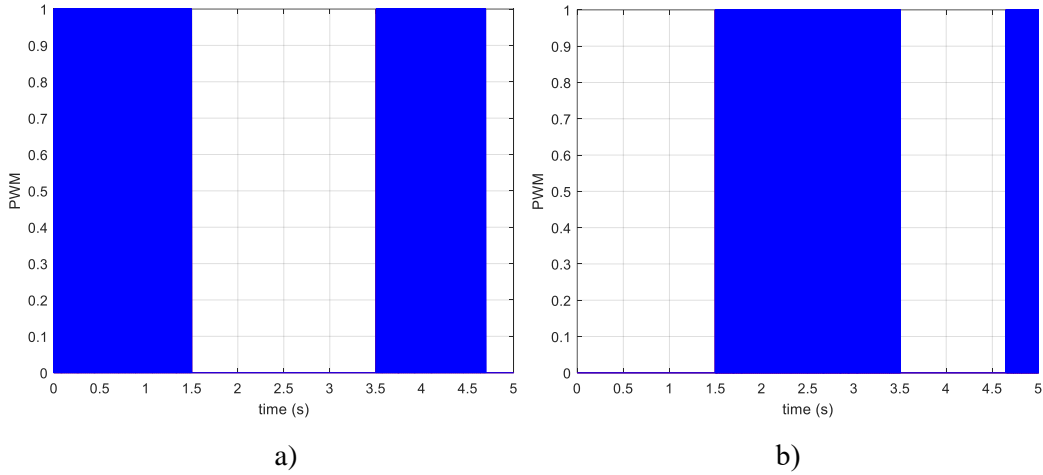
Şekil 14. Li/Ion batarya SOC değeri

Sisteme aktarılan güçler, Şekil 15. de gösterildiği gibidir. Görüleceği gibi, 1.5s ye kadar, Li/Ion batarya güneş enerjisi tarafından şarj olmaktadır, aynı zamanda PMSM de, güneş panelleri vasıtasıyla beslenmektedir. 1.5-3.5s arasında yeterli güneş enerjisi yoktur ve Li/Ion batarya deşarj olarak, PMSM'ye enerji sağlamaktadır. 2.5-4.7s arasında, sistem güneş enerjisi vasıtasıyla beslenmektedir ve batarya şarj olmaktadır. 4.7-5s arasında ise, tekrar Li/Ion batarya, PMSM yi çalıştırmaktadır.



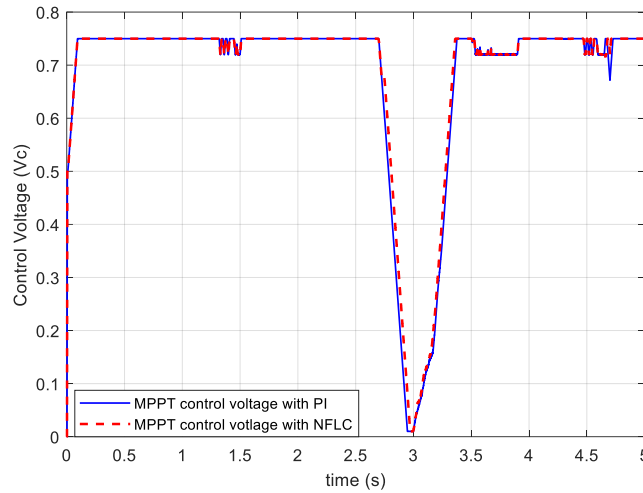
Şekil 15. Sisteme aktarılan güçler

İki yönlü batarya şarj edici anahtarlarının, anahtarlama sinyalleri Şekil 16 da gösterildiği gibidir. $t=0-1.5s$ arasında, yeterli güneş enerjisi olduğu için, lojik denetleyici vasıtasıyla, iki yönlü batarya şarj edici, şarj modunda çalıştırılmıştır ve Li/Ion batarya şarj olmaktadır. $t=1.5-3.5s$ arasında yeterli güneş enerjisi olmadığı için, lojik denetleyici, iki yönlü batarya şarj ediciyi, deşarj modunda çalıştırmıştır ve Li/Ion batarya deşarj olmuş ve PMSM ye enerji sağlamıştır. Benzer şekilde, $t=3.5-4.3s$ arasında, şarj modu ve $4.3-5s$ arasında ise deşarj modu çalışmaları gerçekleşmiştir.



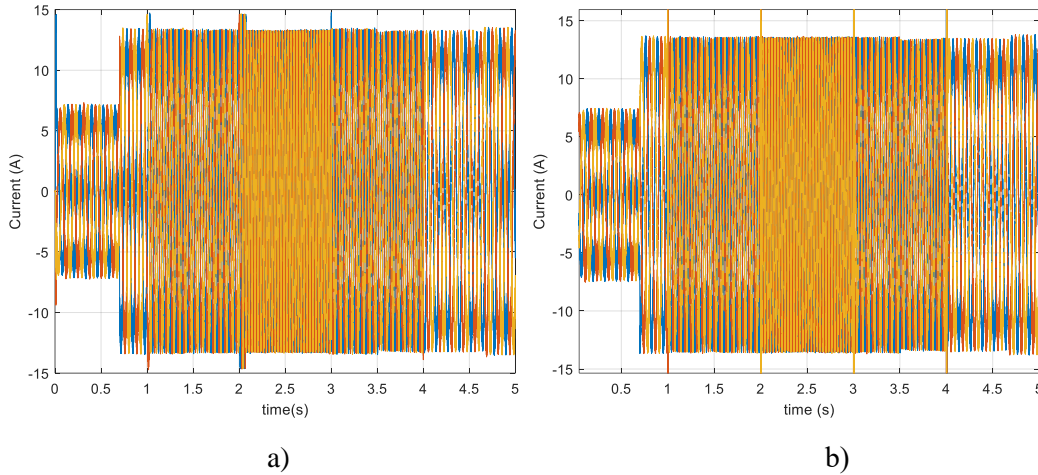
Şekil 16. a) Şarj ve b) Deşarj Modu PWM sinyalleri

P&O algoritması ile üretilen, MPPT kontrol sinyali Şekil 17 de gösterilmiştir. Görüleceği gibi, aydınlanma şiddeti değişimlerine karşılık, algoritma ile kontrol gerilimleri değiştirilmiştir. Ayrıca, düşürücü-yükseltici dönüştürücünün çıkış geriliminin aşırı yükselmesini önlemek amacıyla, maksimum kontrol gerilimi, 0.75V olarak ayarlanmıştır.



Şekil 17. P&O algoritması ile üretilen kontrol sinyali

Şekil 18 de, PMSM stator akımları PI tabanlı ve nütrosofi tabanlı denetimler üzerinden gösterilmektedir. Referans hız ve yük momenti değişimlerinde PMSM'nin çektiği akımların değiştiği de bu şekil ile görülmektedir.



Şekil 18. Stator akımları a) PI, b) NFLC FOC

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, iki yönlü batarya şarj edici kullanan, P&O algoritmali düşürücü-yükseltici MPPT yapısı ile beslenen PMSM'nin AUK hız denetimi nütrosofi bulanık denetleyici üzerinden, değişken yük, değişken ışınım şiddeti ve ortam sıcaklığı altında, benzetim çalışması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Nütrosofi bulanık denetleyici ile klasik PI denetim karşılaştırılması da yapılmıştır. Ayrıca, iki yönlü batarya şarj edici çalışma modu, ışınım şiddeti ve Li/Ion bataryanın SOC değerine göre, şarj ya da deşarj üzere lojik denetleyici ile belirlenmektedir. Ek olarak, şarj modu hem gerilim hem de akım denetleyici döngüsüne, deşarj modu ise sadece gerilim denetleyici döngüsüne sahiptir. Düşürücü-yükseltici dönüştürücünün çıkışına eklenen anahtar da lojik denetleyici üzerinden denetlenmektedir. Bu anahtar ile güneş enerjisi olmadığı durumlarda batarya enerjisinin düşürücü-yükseltici dönüştürücüyü beslemesini engellemek amaçlanmıştır.

Yapılan benzetimler sonucu, sunulan sistem istenildiği gibi, gerekli ışınım şiddeti olduğunda, güneş panelleri üzerinden hem PMSM beslenmektedir hem de Li/Ion batarya şarj edilmektedir. Yeterli ışınım şiddeti olmadığında, PMSM Li/Ion batarya üzerinden beslenmektedir. Li/Ion bataryanın şarj ve deşarj

modları arasındaki geçiş süresi bir işlem süresi kadar kısadır ve PMSM hızı bu değişimlerden etkilenmemektedir.

PMSM hız denetimi nütrosofi bulanık mantık denetleyici ile kusursuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Nütrosofi denetleyici ile PMSM hızının istenilen hız değerine oturma süresi maksimum 0.00785s ve kararlı durum hatası ± 0.18 rad/s olarak elde edilmiştir, PI tabanlı hız denetleyicisi ile de 0.072s ve kararlı durum hatası ise ± 0.34 rad/s olarak elde edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TURAN, E., Bülent, D. A. Ğ., TAMYÜREK, B., & AYDEMİR, M. T. Design and Implementation of an Analog Controller Based on K-factor Design Method for a Novel Isolated Z-Source DC-DC Converter with High Voltage Gain. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(2), 317-334.
- [2] Krishnan, R. (2017). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. CRC press.
- [3] Hendershot, J. R., & Miller, T. J. E. (2010). *Design of brushless permanent-magnet machines* (p. 178). Venice, FL, USA: Motor Design Books.
- [4] Uygun, D., Çetinceviz, Y., (2018). Yüzey yerleştirmeli kalıcı mıknatıslı senkron generatörlerin tutma torkunun azaltılması için stator yapılandırması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(3) 605-620.
- [5] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Implementation of PMSM drive for a solar water pumping system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 4956-4964.
- [6] Antonello, R., Carraro, M., Costabeber, A., Tinazzi, F., & Zigliotto, M. (2016). Energy-efficient autonomous solar water-pumping system for permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 43-51.
- [7] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Reduced sensor-based PMSM driven autonomous solar water pumping system. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(3), 1323-1331.
- [8] Prabhakaran, K. K., Karthikeyan, A., Varsha, S., Perumal, B. V., & Mishra, S. (2020). Standalone single stage PV-Fed reduced switch inverter based PMSM for water pumping application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(6), 6526-6535.
- [9] Murshid, S., & Singh, B. (2018, June). A pv array fed bess supported speed sensor-less pmsm driven water pumping system. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 63-68). IEEE.
- [10] Dubey, M., Sharma, S. K., & Saxena, R. (2018). Solar power based PMSM drive employed in refrigeration plants for isolated areas. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(6), 6299-6308.
- [11] Singh, B., & Murshid, S. (2018). A grid-interactive permanent-magnet synchronous motor-driven solar water-pumping system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 5549-5561.
- [12] Murshid, S., & Singh, B. (2019). A Multiobjective GI-Based Control for Effective Operation of PV Pumping System Under Abnormal Grid Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(11), 6880-6891.
- [13] Murshid, S., & Singh, B. (2019). Utility grid interfaced solar wps using pmsm drive with improved power quality performance for operation under abnormal grid conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1052-1061.

- [14] Jain, S., Thopukara, A. K., Karampuri, R., & Somasekhar, V. T. (2014). A single-stage photovoltaic system for a dual-inverter-fed open-end winding induction motor drive for pumping applications. *IEEE Transactions on power Electronics*, 30(9), 4809-4818.
- [15] Singh, B., Mishra, A. K., & Kumar, R. (2016). Solar powered water pumping system employing switched reluctance motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5), 3949-3957.
- [16] Şehirli, E., Çetinceviz, Y., Current control of SRM fed by SEPIC MPPT based PV array. *European Conference on Renewable Energy Systems*, 7th ECRES, Spain, (2019).
- [17] Kumar, R., & Singh, B. (2017). Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 5(3), 1377-1385.
- [18] Kumar, R., & Singh, B. (2016). BLDC motor-driven solar PV array-fed water pumping system employing zeta converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(3), 2315-2322.
- [19] Şehirli, E., & Çetinceviz, Y. (2020, October). BLDC Speed Control by Bidirectional Battery Charger with SEPIC MPPT. In *2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [20] Chiranjeevi, M., Kumar, D. A., & Kiranmayi, R. (2017, September). Mathematical analysis & modeling of Li-Ion battery with PMSM based plug-in electric vehicles. In *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)* (pp. 1445-1449). IEEE.
- [21] Oukkacha, I., Camara, M. B., & Dakyo, B. (2017, April). Electric vehicles energy management using lithium-batteries and ultracapacitors. In *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1-8). IEEE.
- [22] Park, S. H., Lee, J., Lee, Y. I., & Ahmed, A. A. (2016, December). Development of electric vehicle powertrain: Experimental implementation and performance assessment. In *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)* (pp. 932-937). IEEE.
- [23] Gautam, A. K., Singh, S. P., Pandey, J. P., & Shukla, T. N. (2016, March). Performance investigation of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) drive supplied from hybrid sources. In *2016 International Conference on Emerging Trends in Electrical Electronics & Sustainable Energy Systems (ICETEESES)* (pp. 292-302). IEEE.
- [24] Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012). Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *IEEE transactions on Power Electronics*, 28(5), 2151-2169.
- [25] De Melo, H. N., Trovao, J. P. F., Pereirinha, P. G., Jorge, H. M., & Antunes, C. H. (2017). A controllable bidirectional battery charger for electric vehicles with vehicle-to-grid capability. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(1), 114-123.
- [26] Verma, A., Singh, B., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2020). An implementation of solar PV array based multifunctional EV charger. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(4), 4166-4178.
- [27] Choi, H. H., Yun, H. M., & Kim, Y. (2013). Implementation of evolutionary fuzzy PID speed controller for PM synchronous motor. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11(2), 540-547.
- [28] Erdogan, N. (2019). Elektrikli Sürme Sistemlerinin Gerçek Zamanlı Döngüde Donanımsal Benzetimi ve Kalıcı miktatsız Bir Senkron Motor Sürücü Uygulaması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4), 802-817.

- [29] Junejo, A. K., Xu, W., Mu, C., Ismail, M. M., & Liu, Y. (2020). Adaptive speed control of PMSM drive system based a new sliding-mode reaching law. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 12110-12121.
- [30] Smarandache, F. (2003, September). Definiton of neutrosophic logic-a generalization of the intuitionistic fuzzy logic. In *EUSFLAT Conf.* (pp. 141-146).
- [31] Garip, İ. Güneş Hücresinin Verimini Artırmak İçin Çok Eksenli Takip Sisteminin Tasarımı Ve Uygulaması. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 9(4), 749-759.
- [32] Kazimierczuk, M. K. (2015). *Pulse-width modulated DC-DC power converters*. John Wiley & Sons.



Determination of Total Antioxidant Capacities as Ascorbic Acid Equivalent of Tea Extract Samples from Different Brands Using Digital Image-Based Colorimetric Detection Method

Ozan YAĞMUROĞLU^{1*}

¹National Defence University, Turkish Air Force Academy, Department of Chemistry, 34149, İstanbul, Türkiye

Article Info

Research article

Received: 7.09.2022

Revision: 22.10.2022

Accepted: 24.10.2022

Keywords

CUPRAC

Tea

Total antioxidant capacity (TAC)

Smartphone

Digital image

Abstract

In this study, the Digital Image-Based Colorimetric Detection Method developed by Bakirdere et al. was used to find the TAC (Total Antioxidant Capacity) value of tea samples from different brands. To determine the total amount of antioxidants in tea samples, the CUPRAC (cupric ion reducing antioxidant capacity) method, which is widely used in antioxidant determination, was combined with a digital image-based colorimetric detection system. To use in our study, a box with opaque wood material measuring 24 cm x 19 cm x 17 cm (width/length/depth) was designed and manufactured. In the analysis, the oxidation reaction between the chromogenic copper(II)-neocuproine (Cu(II)-Nc) reagent and antioxidants was utilized. The color change that occurs as a result of the oxidation was calculated using an application on smartphones. In our study, analyzes were performed on 4 different brand tea extract samples (tea A, tea B, tea C, tea D) to determine the total antioxidant capacity of ascorbic acid equivalent. The TAC values for ascorbic acid equivalent in tea extract samples were found as 380 ± 8 mg/L (tea A), 402 ± 4 mg/L (tea B), 213 ± 3 mg/L (tea C), 232 ± 4 mg/L (tea D) using the digital image-based colorimetric detection systems.

1. INTRODUCTION

The oxygen molecule is a critical molecule for aerobic organisms. It has an important role in the formation and continuation of life. However, the oxygen molecule causes the formation of free radicals in the respiration mechanism and metabolism processes. Free radicals are atoms or molecules with one or more unpaired electrons in their outer orbitals. Free radicals can have a positive or negative charge. They are not stable structures. They are also very reactive despite their short half-life. They can interact very easily inside the cell [1-3].

The main conditions that cause free radical formation in the body can be listed as follows; UV rays, various drugs, fat oxidation, immunological reactions, alcohol, redox reactions, stress, alcohol, and smoking. Free radicals formed in the body are generally hydrogen peroxide, hydroxy radical, superoxide anion, peroxy nitrite, hypochlorous acid, and alkoxy radical [4,5]. Free radicals formed in living metabolism affect the formation and progression rate of diseases such as heart diseases, cancer, diabetes, lung diseases, liver diseases, and aging-related diseases. It is very important to neutralize free radicals in the body to prevent the formation of these diseases or to reduce the rate of progression. Antioxidants play a role in preventing the harmful effects of free radicals [6,7].

Antioxidants in our metabolism are used to prevent the formation of existing free radicals or to eliminate their destructive effects by interacting with existing free radicals. Antioxidants are also the main component of anti-aging products. In addition to being produced by the body, antioxidants can also be taken from the

outside through food. The main antioxidants taken by food are vitamins (C, A, and E), flavonoids, carotenoids, and polyphenols [8]. Ascorbic acid (vitamin C) is a water-soluble chemical with antioxidant properties. Because of endiol group in its structure, it shows acidic properties as well as reducing properties. It cannot be synthesized by the human body. For this reason, ascorbic acid is taken into the body from the outside through food [9].

Due to the critical role of antioxidants in preventing the extremely negative effects of free radicals in the body, it is necessary to know the total antioxidant capacity (TAC), which reveals the total amount of all antioxidants in the samples. TAC value is one of the criteria used in the processes of determining the quality of foods [10,11].

There are many methods with different scientific approaches to determine the total amount of antioxidants in samples. Total antioxidant capacity (TAC) determination techniques can be grouped under two headings as methods based on electron transfer (ET) and methods based on hydrogen atom transfer (HAT) reactions. While the HAT method is based on competitive kinetic reactions, the color change is used in ET-based methods [12]. The Cupric ion-reducing antioxidant capacity (CUPRAC) method is among the methods of determining antioxidant capacity based on electron transfer [13].

In the CUPRAC method, firstly, copper(II)-neocuproin complex (Cu(II)-Nc) is obtained as a result of the reaction between 2,9-dimethyl-1,10-phenanthroline (Neocuproin-Nc) and Cu(II). The synthesized complex is reduced to copper(I)-neocuproin [Cu(I)-Nc] chelate in the presence of an antioxidant. During this reduction event, the maximum absorbance occurs at 450 nm. Using this approach, the total antioxidant capacity in the samples can be determined [14].

This method is frequently used to determine the TAC values of different antioxidant sources [15,16]. Studies on the determination of antioxidant levels in herbal tea [17], human serum [18], tea [19], and apricot [20] samples by using the CUPRAC technique and using different analysis methods are reported in the literature.

Colorimetric analysis methods developed by utilizing the color change that occurs as a result of the interaction of the analyte with different chemicals in sample analysis have been used for a long time. Recently, with the developing technology, color changes in the sample environment have started to be detected by digital imaging methods [21,22].

The analysis method developed using this imaging technique is called Digital Image Colorimetry (DIC). In digital image colorimetry (DIC), analyses can be performed using RGB (red-green-blue) values in digital images obtained with smartphone cameras, portable cameras, and similar imaging methods. Colors can be evaluated in terms of three basic components (RGB). Each component can be expressed numerically with a number between 0 and 255 [23-26].

In this study, the total antioxidant capacity (TAC) value in tea extract samples belonging to different brands was determined by digital image-based colorimetric detection using the imaging box developed within the scope of the study as the analysis device. The CUPRAC assay was used to determine the TAC value in tea extract samples. The TAC value was calculated as the equivalent antioxidant capacity of ascorbic acid.

2.MATERIALS AND METHODS

2.1. Instrumentation

In the sample preparation procedures, Shimadzu ATX224R analytical balance was used for weighing. pH measurements were conducted with the Ohaus Starter 3100 pH-ion meter. KUDOS SK 3310 HP ultrasonic water bath was used for homogenization in sample preparation processes. In the study carried out, Daihan MSH-20A Magnetic Stirrer with Analog Heater and DLAB MX-S Vortex were employed for mixing processes. A Huawei (Android 9.0) smartphone with 16 megapixels and an f/2.2 lens aperture was used for digital imaging for colorimetric analysis. The flash lamp of the smartphone was not used during digital imaging. To use in our study, a box with opaque wood material measuring 24 cm x 19 cm x 17 cm (width/length/depth) was designed and manufactured (Figure 1). The inner surface of the box is produced in white color to ensure that the light inside is reflected homogeneously in all directions. 12 V white LED strips of equal length are attached to the ceiling and side surfaces of the box. A cutout with a diameter of

2.2 cm was drilled on the cover of the box for the placement of the smartphone's camera. To ensure stability and optimization during the analysis, a sample placement part was made in the box, sized to fit 10 mm quartz cuvettes. The Color Detector smartphone application was used to determine the RGB values during the analysis.

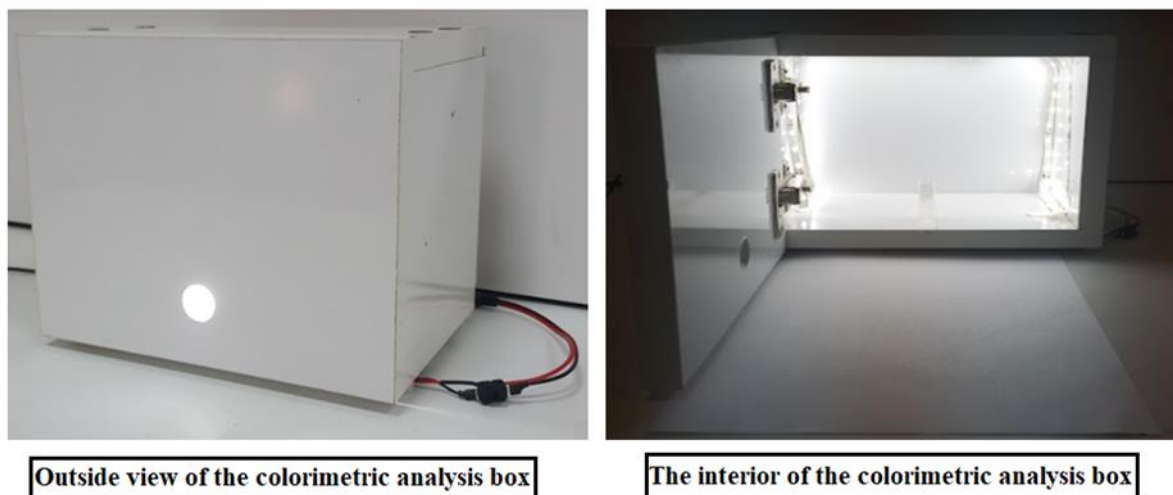


Figure 1. Schematic representation of the designed colorimetric analysis box

2.2. Chemicals

Neocuproine standards and Ascorbic acid were obtained from Sigma-Aldrich, Germany. Ethanol was used as a solvent in the stock standard solution to be used during the study for ascorbic acid. The dilution of the standard solution was done with ethanol. As part of the modified CUPRAC analysis, 1.0×10^{-2} M Cu(II) solution was prepared by dissolving CuCl_2 in deionized water. A standard solution of 9.5×10^{-3} M neocuproine (Nc) was obtained using ethanol as solvent. 1.0 M ammonium acetate (NH_4Ac) buffer solution was prepared by using the solution of NH_4Ac in deionized water. NH_4Ac , ammonia solution (25%), CuCl_2 , and Na_2HPO_4 were all obtained from Merck, Germany. During the study, ultrapure water obtained from the Elektro-Mag Laboratory Water Drop M4 system was used for sample/standard preparation and cleaning of all glassware.

2.3. Digital Image-Based Cuprac Method

In our study, the CUPRAC method described by Bakirdere [23] was used. As part of the CUPRAC method, 1.0 mL of 9.5×10^{-3} M solution of neocuproine and 1.0 mL of 1.0×10^{-2} M copper(II) were added to a centrifuge tube. Then, 1.0 mL of 1.0 M pH 7.5 ammonium acetate buffer was added to the same tube to adjust the pH of the medium. Finally, 0.4 mL of standard solution was added to the centrifuge tube. The sample volume was made up to 4 mL with deionized water. Colorimetric analysis studies were carried out using the digital imaging box (Figure 1) designed with the last sample obtained. During the analysis, attention was paid to taking the image from the same area in the sample cuvette. Measurements were captured three times for each standard/sample.

2.4. Procedure

Tea extract samples of four different brands were taken from a local market in İstanbul. In the continuation of the study, these teas will be mentioned as tea A, Tea B, Tea C, and Tea D. Using the tea brewing method recommended by the tea companies in their packages, 2 grams of tea sample was added into 125 mL of boiled distilled water. It waited for 15 minutes for the teas to brew. 0.4 mL samples were prepared by diluting the prepared stock tea extract samples 15 times. Then, digital image-based colorimetric analysis of tea extract samples belonging to four different brands was performed. TAC values in the tea samples were calculated by using the results obtained as a result of the analysis and the calibration graph drawn.

3.RESULTS

The values defined by Bakirdere et al. were used as optimum conditions for variables within the scope of the study [23]. Considering the effect of the concentrations of the reagents on the formation reaction of the Cu(II)-Nc complex, 10 mM Cu(II) and 9.5 mM neocuproine were used. Another parameter that affects the complexation reaction is the pH of the medium. A buffer with a pH value of 7.5 was used within the scope of the study. The duration of the oxidation reaction between the synthesized Cu(II)-Nc complex and the antioxidants was determined as 45 minutes. When the R, G, and B color channels used in monitoring the antioxidant concentration in the sample medium are compared, the B channel is used because it has more linear data [23].

3.1. Analytical Figures of MERIT

The analytical performance of the digital image-based colorimetric system based on the CUPRAC assay, which will be used within the scope of our study, was evaluated. For this purpose, colorimetric analysis of samples containing different concentrations of ascorbic acid was performed to obtain a calibration plot. The blue intensity values obtained as a result of the colorimetric analysis of the samples based on digital imaging are shown in Table 1, and the calibration graph drawn using these values is shown in Figure 2.

Table 1. Blue intensity value of samples at different concentrations

| <i>Concentration (mg/L)</i> | <i>Blue Intensity</i> |
|---------------------------------|-----------------------|
| <i>1</i> | <i>102</i> |
| <i>2</i> | <i>80</i> |
| <i>3</i> | <i>61</i> |
| <i>4</i> | <i>44</i> |

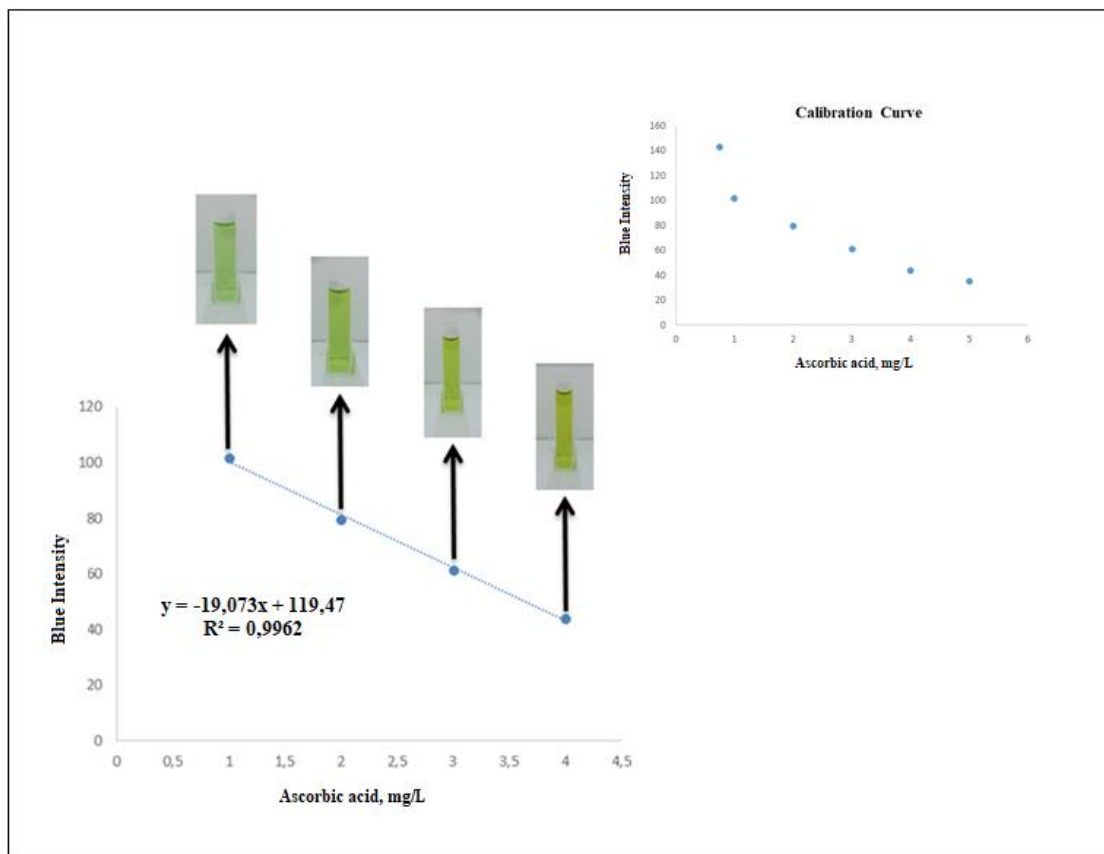


Figure 2. Calibration plot of varying blue intensity versus increasing concentration of ascorbic acid

While creating the calibration plot, the intensity of the blue color, one of the RGB color tones, was used as the analysis parameter. When different concentrations of ascorbic acid are added to the Cu(II)/Nc complex, a change in the intensity of the blue color occurs. During the analysis, three digital images were taken for each sample and the color intensity of four different points of each image was measured. As a result of the measurement results, linearity was observed in the range of 1.0-4.0 mg/L. The correlation coefficient of the drawn calibration plot was calculated as 0.9962. Limits of quantification (LOQ) and detection (LOD) values were found to demonstrate the accuracy and sensitivity of the analytical method developed. Eight repetitive absorbance measurements of the lowest concentration in the calibration plot were performed to calculate the LOD and LOQ values. Using these measurement results, the standard deviation (SD) value was calculated. Calculations were made using the $3SD/m$ (m =slope of the calibration plot) formula for the LOD value and the $10SD/m$ formula for the LOQ value. As a result of the calculations, the limit of detection value for the analytical method we developed was 0.4 mg/L, and the limit of quantification value was 1.3 mg/L. The percent relative standard deviation value (%RSD) of the analytical method developed was found to be 2.3%. This value shows that the method has high reproducibility.

3.2. TAC Analysis of Different Brands of Tea

Within the scope of TAC analysis, four different brands of tea were purchased. These teas are coded as tea A, tea B, tea C, and tea D. Analyzes were carried out by taking 0.4 mL of the tea extract samples prepared as described in the procedure section. The digital images obtained during the analysis of tea A, tea B, tea C, and tea D are shown in Figure 3.

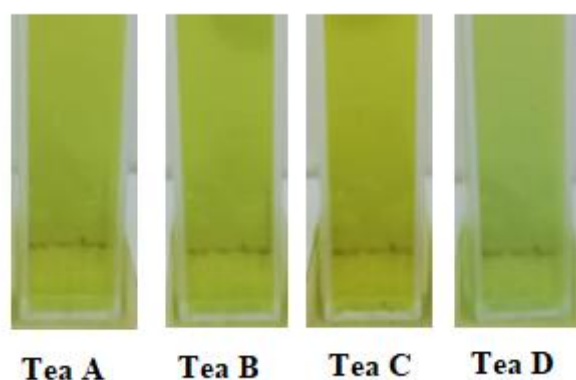


Figure 3. Digital images of different brands of tea extract samples

Analyzes based on the blue color intensity of teas belonging to different brands were carried out with digital imaging techniques. Digital-image-based colorimetric analysis results of tea extract samples are given in Table 2.

Table 2. Colorimetric analysis results of tea extract samples

| <i>Samples</i> | <i>Blue Intensity</i> | <i>TAC Value (mg/L)</i> |
|----------------|-----------------------|-------------------------|
| <i>Tea A</i> | 59 | 380 ± 8 |
| <i>Tea B</i> | 56 | 402 ± 4 |
| <i>Tea C</i> | 85 | 213 ± 3 |
| <i>Tea D</i> | 83 | 232 ± 4 |

When the results in Table 2 are examined, it is seen that the tea with the highest antioxidant content among the four different tea brands is Tea B. Tea B is followed by Tea A, Tea D, and Tea C, respectively.

4.CONCLUSIONS

In our study, TAC values of teas belonging to different brands were determined by using color change due to the presence of antioxidants during the CUPRAC assay. The color change in the analysis environment was followed by the digital image-based colorimetric method. Within the scope of this study, a completely original digital image-based colorimetric analysis box was designed and manufactured. The developed colorimetric analysis box is made of opaque material. Its inner surface is covered with white-colored material to ensure the homogeneous spread of light around the sample. Analyzes were carried out using a smartphone as the imaging device, thanks to a cutout on the front surface of the colorimetric analysis box. With the developed colorimetric analysis box, firstly, the analysis of ascorbic acid samples with known concentrations was carried out using the CUPRAC assay. A calibration curve was drawn using the measurement results and a linear region was observed in the range of 1-4 ppm ascorbic acid. Antioxidant capacities of tea extracts were calculated as ascorbic acid equivalents using the determined linear region.

REFERENCES

- [1] Cheeseman, K. H., & Slater, T. F. (1993). An introduction to free radical biochemistry. *British Medical Bulletin*, 49(3), 481–493. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.bmb.a072625>
- [2] Phaniendra, A., Jestadi, D. B., & Periyasamy, L. (2015, January 1). Free Radicals: Properties, Sources, Targets, and Their Implication in Various Diseases. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*. Springer India. <https://doi.org/10.1007/s12291-014-0446-0>
- [3] Wu, J. (2020, September 1). Tackle the free radicals damage in COVID-19. *Nitric Oxide - Biology and Chemistry*. Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2020.06.002>
- [4] Kopáni, M., Celec, P., Danišovič, L., Michalka, P., & Biró, C. (2006, February). Oxidative stress and electron spin resonance. *Clinica Chimica Acta*. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2005.05.016>
- [5] Halliwell, B., & Aruoma, O. I. (1991, April 9). DNA damage by oxygen-derived species Its mechanism and measurement in mammalian systems. *FEBS Letters*. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(91\)80347-6](https://doi.org/10.1016/0014-5793(91)80347-6)
- [6] Gong, Y., Huang, X. Y., Pei, D., Duan, W. D., Zhang, X., Sun, X., & Di, D. L. (2020). The applicability of high-speed counter current chromatography to the separation of natural antioxidants. *Journal of Chromatography A*, 1623. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461150>
- [7] Romera-Castillo, C., & Jaffé, R. (2015). Free radical scavenging (antioxidant activity) of natural dissolved organic matter. *Marine Chemistry*, 177, 668–676. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2015.10.008>
- [8] Rice-Evans, C. A., Miller, N. J., & Paganga, G. (1997). Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Science*. Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(97\)01018-2](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(97)01018-2)
- [9] Buettner, G. R. (1993). The Pecking Order of Free Radicals and Antioxidants: Lipid Peroxidation, α -Tocopherol, and Ascorbate. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 300(2), 535–543. <https://doi.org/10.1006/abbi.1993.1074>
- [10] Cárdenas, A., Gómez, M., & Frontana, C. (2014). Development of an electrochemical cupric reducing antioxidant capacity method (CUPRAC) for antioxidant analysis. *Electrochimica Acta*, 128, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.10.191>
- [11] Zhao, W., Xiang, Y., Xu, J., He, X., & Zhao, P. (2020). The reversible surface redox of polymer dots for the assay of total antioxidant capacity in food samples. *Microchemical Journal*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104805>
- [12] Cao, G., Sofic, E., & Prior, R. L. (1997). Antioxidant and prooxidant behavior of flavonoids: Structure-activity relationships. *Free Radical Biology and Medicine*, 22(5), 749–760. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(96\)00351-6](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(96)00351-6)
- [13] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., & Karademir, S. E. (2004). Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(26), 7970–7981. <https://doi.org/10.1021/jf048741x>
- [14] Özyürek, M., Bektaşoğlu, B., Güçlü, K., Güngör, N., & Apak, R. (2010). A novel hydrogen peroxide scavenging assay of phenolics and flavonoids using cupric reducing antioxidant capacity (CUPRAC) methodology. *Journal of Food Composition and Analysis*, 23(7), 689–698. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2010.02.013>
- [15] Karadirek, Ş., Kanmaz, N., Balta, Z., Demirçivi, P., Üzer, A., Hizal, J., & Apak, R. (2016). Determination of total antioxidant capacity of humic acids using CUPRAC, Folin-Ciocalteu, noble metal

nanoparticle- and solid-liquid extraction-based methods. *Talanta*, 153, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2016.03.006>

[16] Prenesti, E., Berto, S., Gosmaro, F., Fisticaro, P., Bagnati, M., & Bellomo, G. (2020). Measurement uncertainty evaluation of the Total Antioxidant Capacity of human plasma tested by the CUPRAC-BCS method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 152. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107289>

[17] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Esin Karademir, S., & Erçğ, E. (2006). The cupric ion reducing antioxidant capacity and polyphenolic content of some herbal teas. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 57(5–6), 292–304. <https://doi.org/10.1080/09637480600798132>

[18] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Esin Karademir, S., & Altun, M. (2005). Total antioxidant capacity assay of human serum using copper(II)-neocuproine as chromogenic oxidant: The CUPRAC method. *Free Radical Research*, 39(9), 949–961. <https://doi.org/10.1080/10715760500210145>

[19] Krylova, E., Gavrilenko, N., Saranchina, N., & Gavrilenko, M. (2016). Novel Colorimetric Sensor for Cupric Reducing Antioxidant Capacity (CUPRAC) Measurement. In *Procedia Engineering* (Vol. 168, pp. 355–358). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.120>

[20] Güçlü, K., Altun, M., Özyürek, M., Karademir, S. E., & Apak, R. (2006). Antioxidant capacity of fresh, sun- and sulphited-dried Malatya apricot (*Prunus armeniaca*) assayed by CUPRAC, ABTS/TEAC and folin methods. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(SUPPL. 1), 76–85. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01347.x>

[21] Catelani, T. A., Bittar, D. B., Pezza, L., & Pezza, H. R. (2019). Determination of amino acids in gym supplements using digital images and paper platform coupled to diffuse reflectance spectroscopy and USB device. *Talanta*, 196, 523–529. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.12.052>

[22] Zamora-Garcia, I., Correa-Tome, F. E., Hernandez-Belmonte, U. H., Ayala-Ramirez, V., & Ramirez-Paredes, J. P. (2021). Mobile digital colorimetry for the determination of ammonia in aquaculture applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105960>

[23] Borahan, T., Girgin, A., Atsever, N., Zaman, B. T., Chormey, D. S., & Bakırdere, S. (2022). Development of a double-monitoring method for the determination of total antioxidant capacity as ascorbic acid equivalent using CUPRAC assay with RP-HPLC and digital image-based colorimetric detection. *European Food Research and Technology*, 248(3), 707–713. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03923-7>

[24] Lin, B., Yu, Y., Cao, Y., Guo, M., Zhu, D., Dai, J., & Zheng, M. (2018). Point-of-care testing for streptomycin based on aptamer recognizing and digital image colorimetry by smartphone. *Biosensors and Bioelectronics*, 100, 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.09.028>

[25] Masawat, P., Harfield, A., & Namwong, A. (2015). An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk. *Food Chemistry*, 184, 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.089>

[26] Silva, A. F. S., & Rocha, F. R. P. (2020). A novel approach to detect milk adulteration based on the determination of protein content by smartphone-based digital image colorimetry. *Food Control*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107299>

7075 Al Alaşımına Uygulanan Kriyojenik ve Doğal Yaşlandırma İşleminin Avrami Parametresine Etkisi

Gözde ALTUNTAŞ¹ , Bülent BOSTAN¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 23.09.2022
Revision: 20.10.2022
Accepted: 13.11.2022

Highlights

- Thermodynamics
- Metals and Alloys
- Avrami Parameter

Keywords

Natural Aging,
Al 7075,
Cryogenic Treatment,
Avrami Parameter

In this study, a research was conducted on precipitation kinetics by adding cryogenic treatment to aluminum alloys subjected to natural aging heat treatment.

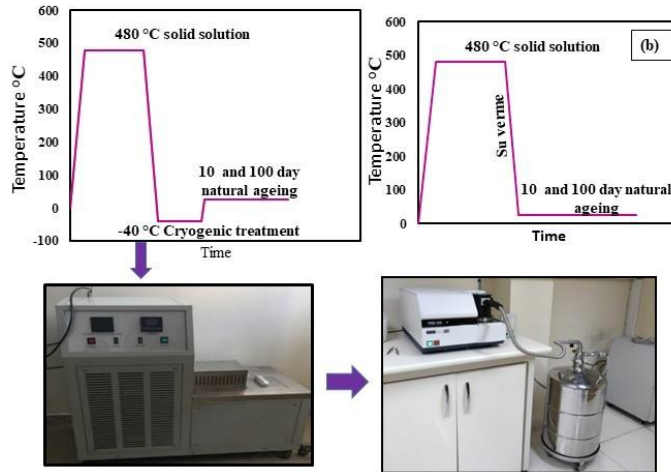


Figure A. Systematics of cryogenic and natural aging heat treatment

Purpose: The η' phase ($MgZn_2$) formed at the end of the aging heat treatment in 7xxx series Al alloys is known as the main strengthening phase. The thermodynamically growth nucleation rate of this phase basically affects the strength. With this study, it is aimed to examine the effect of cryogenic treatment on the η' phase that occurs during natural aging.

Theory and Methods: In addition to the samples subjected to natural aging at certain periods, other samples were also subjected to cryogenic treatment at -40 °C and natural aging, and the differences were examined by DSC analysis. Growth and nucleation rates were calculated by the well-known Johnson-Mehl-Avrami and Ozawa equations.

Results: The results showed that only naturally aged samples had less avrami parameter than cryogenic+natural aged samples.

Conclusion: Higher avrami parameter with cryogenic + natural aging heat treatment affects the strength positively. Because the Avrami parameter is greater than 1, it shows that it grows with two-dimensional growth and volumetric nucleation. If the Avrami parameter is 1, it shows that η' phase grows in one dimension and there is superficial nucleation. The two-dimensional growth and volumetric nucleation of the η' phase indicates that the strength will increase as it will lock the dislocations.



The Effect of Cryogenic and Natural Aging Process on the Avrami Parameter of 7075 Al Alloy

Gözde ALTUNTAŞ^{1*} Bülent BOSTAN¹

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 23.09.2022
Düzeltilme: 20.10.2022
Kabul: 13.11.2022

Keywords

Natural Aging,
Al 7075,
Cryogenic Treatment,
Avrami Parameter

Anahtar Kelimeler

Doğal Yaşlandırma
Al 7075
Kriyojenik İşlem
Avrami Parametresi

Abstract

In this study, aging heat treatment was applied to 7075 Al alloy at room temperature for 10 days and 100 days. Some samples were cryogenically treated at -40 °C for 2 hours after solution heat treatment and then naturally aged for the specified times. Each sample was analyzed by Differential Scanning Calorimetry (DSC) after natural aging. As a result of the analysis, the transformation curves of the metastable η' phase (MgZn₂), known as the main strength phase, were found. Avrami parameters (n) were calculated with Johnson-Mehl-Avrami (JMA) and Ozawa equations. With the avrami parameter to be obtained as a result of the calculations, it was investigated how many dimensions of growth and nucleation in the phase in which the transformation took place. The results showed that the sample, which was naturally aged for 10 days after cryogenic treatment, grew in two dimensions and had volumetric nucleation.

Temsili Durum Transferi Yaklaşımı ile Akaryakıt İstasyonu ve Tüketicileri Üzerine Uygulama Geliştirme

Öz

Bu çalışmada 7075 Al alaşımına oda sıcaklığında 10 gün ve 100 gün süreli yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Bir kısım numune çözeltiye alma ısıl işleminden sonra -40 °C de 2 saat kriyojenik işlem sonrası belirtilen sürelerde yaşlandırılmıştır. Her numune doğal yaşlanma işleminden sonra Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile analiz edilmiştir. Analizler sonucu ana mukavemetlenme fazı olarak bilinen yarı kararlı η' fazının (MgZn₂) dönüşüm eğrileri bulunmuştur. Johnson-Mehl-Avrami (JMA) ve Ozawa eşitliği ile avrami parametreleri (n) hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda elde edilecek olan avrami parametresi ile dönüşümün gerçekleştiği fazın kaç boyutta büyüme ve çekirdeklenme gösterdiği araştırılmıştır. Sonuçlar kriyojenik işlem sonrası 10 gün doğal yaşlandırma yapılan numunenin iki boyutta büyüdüğünü ve hacimsel çekirdeklendiğini göstermiştir. Sadece doğal yaşlanan numunelerin ve kriyojenik işlem sonrası 100 gün doğal yaşlanma yapılan numunenin ise tek boyutta büyüdüğü ve yüzeysel çekirdeklendiği belirlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

7075 alüminyum alaşımları, yüksek mekanik ve düşük yoğunluğa sahip olmalarından dolayı otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Yaşlandırma ısıl işlemi uygulanabilen 7xxx serisi alaşımları bu şekilde yüksek mukavemet sağlamış olur [2-5]. Bu alaşımlar Ana element olarak Al, Zn, Mg ve Cu içerir. Al-Mg alaşım sistemine çinko ilavesi, alüminyumun magnezyumdaki katı çözünürlüğünü azaltır, yaşlanma üzerine oluşan çökelti fazının miktarını artırır ve böylece mukavemette bir artışa neden olur [6]. Al-Zn-Mg-Cu alaşımları için, yaşlanmayla sertleştirme esas olarak aşağıdaki yaşlanma yoluna dayanmaktadır:

Aşırı doymuş katı çözelti – Guinier-Preston (GP) bölgeleri I-GP II – η' (MgZn₂) – η (MgZn₂)

GP bölgeleri çözünen açısından zengin uyumlu kümelerdir. η' yarı uyumlu hegzagonal bir yarı kararlı fazdır. η ise kararlı ve uyumsuz hegzagonal fazdır [7-10]. Genel olarak, alüminyum alaşımlarındaki çökelme ve çözünme reaksiyonlarının kinetiği, izotermal ve izotermal olmayan koşullar altında kinetiği incelemek için diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) teknikleri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca bu analiz tekniği ile endotermik ve egzotermik reaksiyonlar bulunmuştur. Oluşan fazların çözünme ve çökelme sıcaklıkları belirlenmiştir [11-13]. Al–Zn–Mg–Cu alaşımlarında sertleşme ve mukavemet artışı GP bölgelerinin çökmesine ve genellikle GP bölgelerinden çekirdeklenen η' yarı kararlı faza atfedilir [14,15].

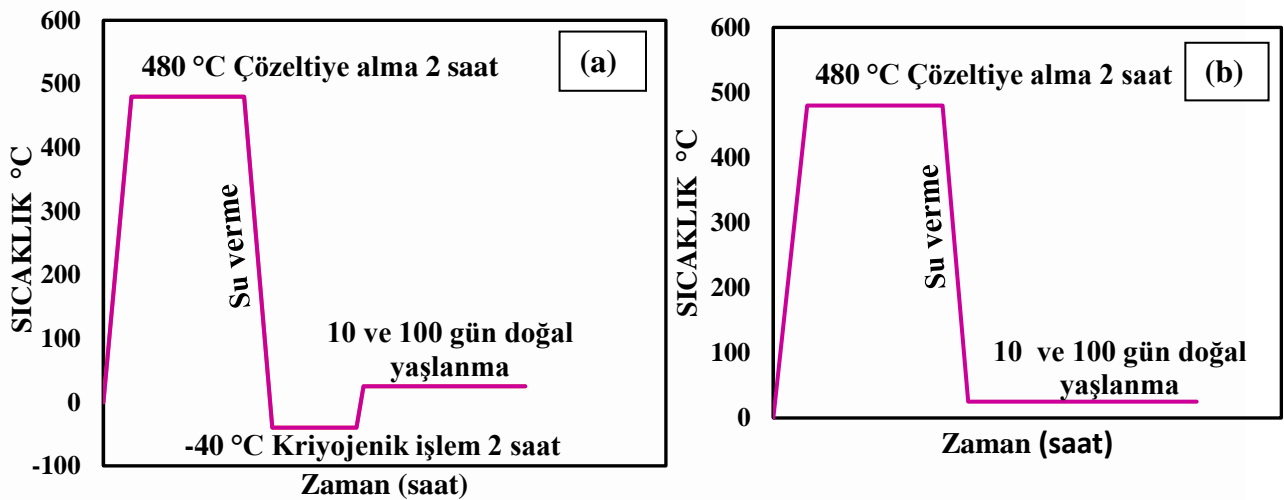
Termal analiz yöntemleri izotermal ve izotermal olmayan yöntemler diye iki gruba ayrılır. Kristalizasyon kinetiği büyüme ve çekirdeklenme mekanizmalarını içerir. Bu çalışmada 7075 Al alaşımına uygulanan kriyojenik ve doğal yaşlanma işleminin DSC analizi ile çökelti kinetiği incelenmiştir. İzotermal ve izotermal olmayan yöntemlerle mukavemetlenme fazı olarak geçen η' fazının avrami parametresi hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar sonucu avrami parametresiyle η' fazının kaç boyutta büyüdüğü ve nasıl çekirdeklendiği bulunmuştur.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Deneyisel çalışmada 7075 alüminyum levha malzeme kullanılmıştır. Malzemenin kimyasal bileşimi % ağırlık olarak Tablo 1 de verilmiştir.

| Elementler (%) | | | | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-------|
| Zn | Mg | Cu | Fe | Mn | Si | Cr | Ti | Al |
| 5.9 | 2.7 | 1.8 | 0.4 | 0.3 | 0.35 | 0.25 | 0.2 | Kalan |

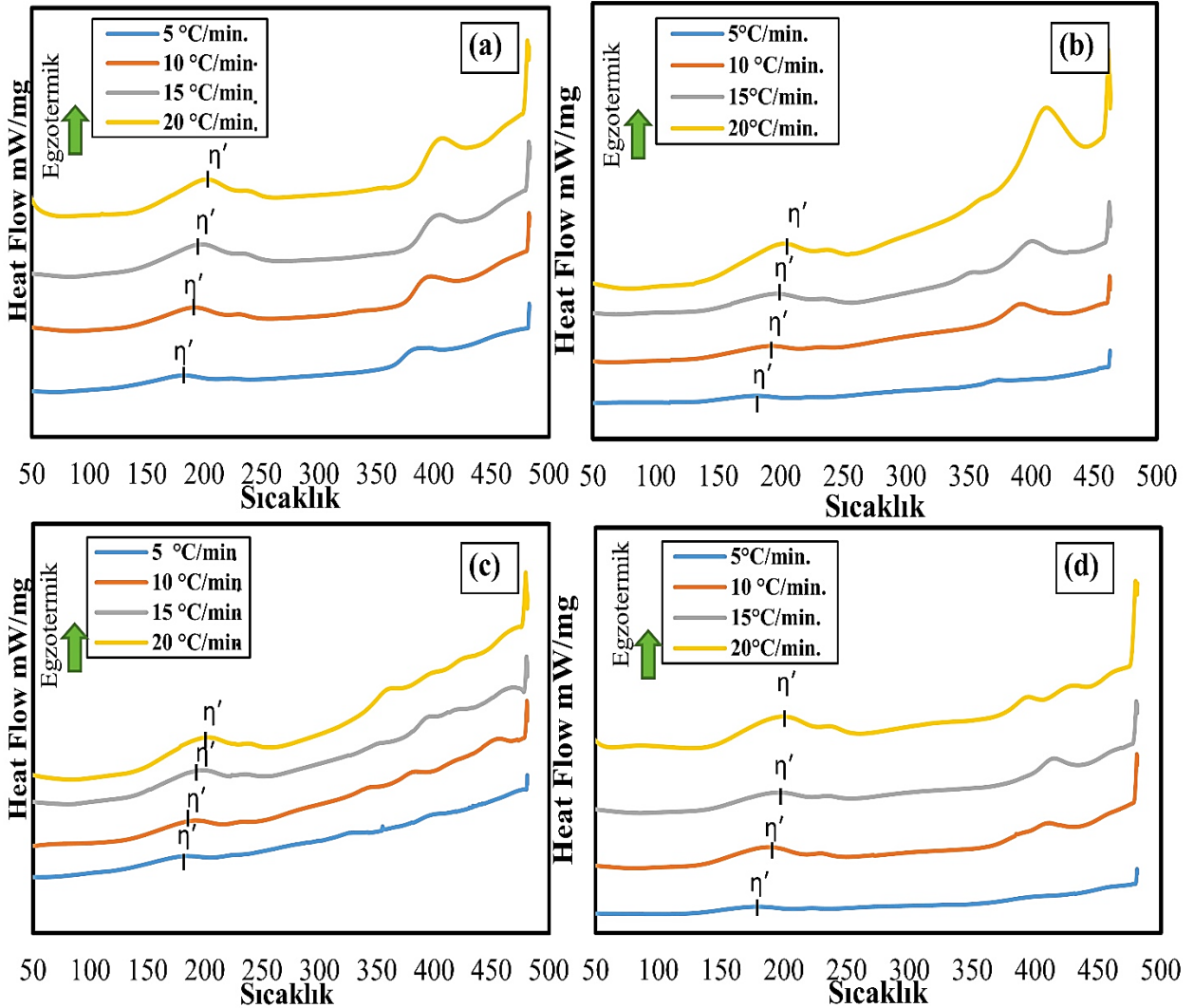
İlk olarak Al 7075 alaşımına kamara tip yatay yüksek sıcaklık fırınında Şekil 1 (a ve b) de gösterildiği gibi 480 °C 2 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Çözeltiye alma işleminden sonra -40 °C ye soğutulurak 2 saat kriyojenik işlem yapıp ardından oda sıcaklığında 10 gün ve 100 gün doğal yaşlanmaya bırakılmıştır. Bu numuneler CNA10 ve CNA100 olarak adlandırılmıştır. Diğer numuneler ise 480 °C 2 saat çözeltiye alma işleminden sonra oda sıcaklığında su verilip 10 ve 100 gün doğal yaşlanma işlemine tabi tutulmuştur. Bu numuneler SNA10 ve SNA100 olarak adlandırılmıştır. DSC deneylerini gerçekleştirmek için HİTACHI DSC 7020 termal analiz cihazı kullanılmıştır. Testler, 5 °C/dk, 10 °C/dk, 15 °C/dk, 20 °C/dk ısıtma hızı ile argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Alüminyum panlar içine alınmış 10 mg kütleli numuneler ile test edilmiştir.



Şekil 1. Numunelere uygulanan kriyojenik ve doğal yaşlanma işleminin çevrimi. (a) -40 °C kriyojenik işlem uygulandıktan sonra 10 ve 100 gün doğal yaşlanan (b) 10 ve 100 gün doğal yaşlanan

3. SONUÇLAR VE TARIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kriyojenik işlem ve doğal yaşlandırma ile oluşan fazların gelişimleri DSC analizi ile incelenmiştir. Şekil'2 de numunelerin DSC grafikleri görülmektedir. Isıtma hızı arttıkça grafiğin sağa doğru ilerlediği görülmektedir. Bu durumun nedeni çekirdeklenme oranından kaynaklandığı bilinmektedir. Isıtma hızı yavaş olduğunda enerjiyi depolama süresi artacağından numunedeki çekirdeklenme oranı da artacaktır. Yüksek sıcaklıklarda yeni faz oluşumları, ekzotermik olarak sayılırken, kristal yapının bozulması ya da farklı bir faza geçerken çözünme olması endotermik reaksiyonlara örnek verilebilir [16-18]. Farklı ısıtma hızları ile elde edilen eğimler ile ana mukavemetlenme fazı olarak bilinen η' fazının ($MgZn_2$) avrami parametresi hesaplanmıştır. Tablo'2 de JMA ve Ozawa denklemi ile hesaplanan avrami parametreleri (n) görülmektedir. Tablo'3 de ise n değerine bağlı kristalleşme mekanizmasıyla, büyüme mekanizması ve çekirdeklenme türü belirtilmiştir.

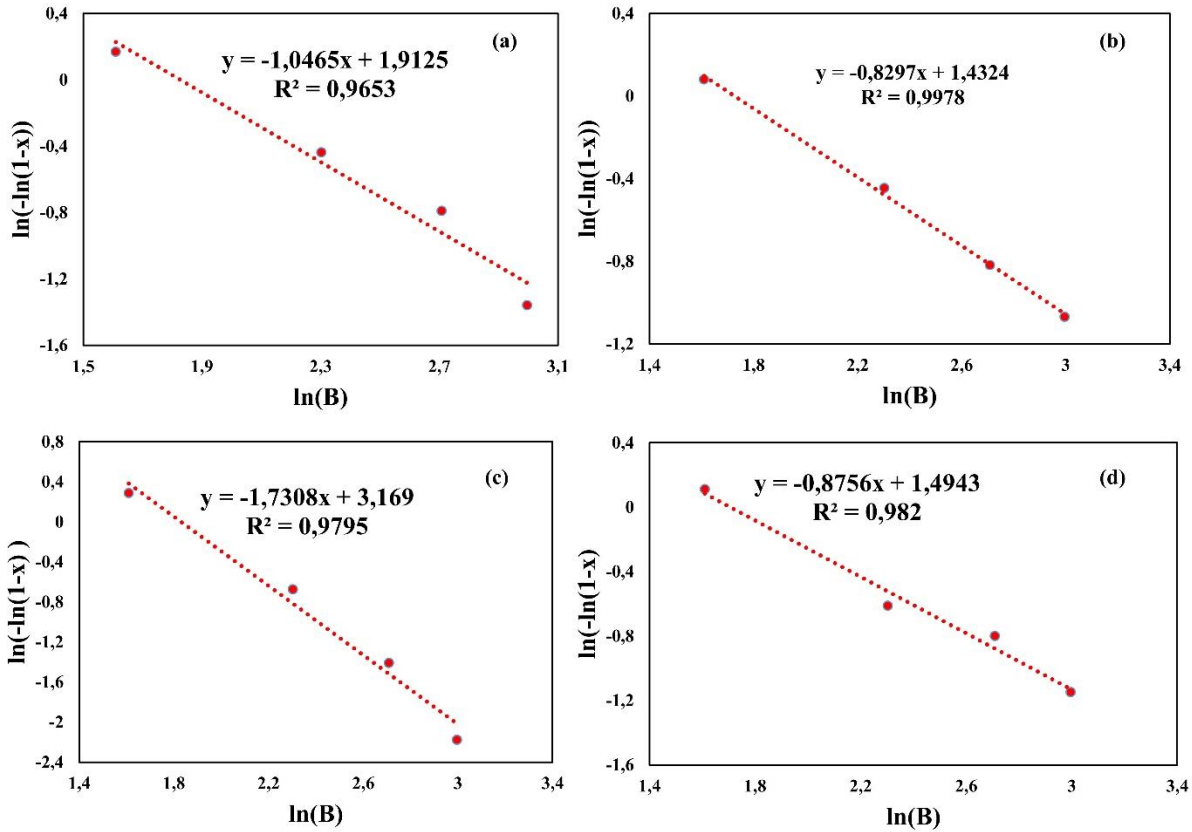


Şekil 2. Farklı ısıtma hızlarında analiz edilen numunelerin DSC grafikleri a) SNA10 b)SNA100 c) CNA10 d) CNA100 numunesinin

Avrami parametresi (n) eşitlik 1 de ki Ozawa denklemine [19] göre hesaplanabilir. Ozawa denklemi izotermal olmayan bir yöntemdir. Yani numune ve referans malzemeye farklı ısıtma hızlarında analizler yapılır, ısı değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak grafik çizilir.

$$n = - \frac{d[\ln(-\ln(1-x))]}{d\ln(\beta)} \quad (1)$$

Burada; β ısıtma hızı, x dönüşüm oranıdır. Şekil 3 de Ozawa Eşitliğindeki $\ln(-\ln(1-x))$ karşılık $\ln\beta$ grafiğinin eğimi, yani n değerini verir.



Şekil 3. Ozawa Eşitliğindeki $\ln(-\ln(1-x))$ karşılık $\ln\beta$ grafiğinin eğimi. a) NA10 b)NA100 c) CNA10 d) CNA100 numunesinin

Avrami parametresi (n) aynı zamanda Johnson-Mehl-Avrami (JMA) ile de hesaplanmaktadır. İzotermal hesaplama yöntemi JMA [20] teorisine dayanmaktadır. İzotermal yöntemde numune ve referans hızlı bir ön ısıtma ile istenilen sıcaklığa çıkarılıp zamanın bir fonksiyonu olarak grafiği çizilir. Bir faz çökeltmesi sırasında dönüştürülmüş eşitliği evrimi şu şekilde verilir:

$$X=1-\exp [-(kt)^n] \quad (2.1)$$

(2.1) denkleminin logaritmasının alınması ve yeniden düzenlenmesi ile de;

$$\ln [-(1-X)] = n \ln k + n \ln t \text{ denklemi elde edilir.} \quad (2.2)$$

Reaksiyon hız sabiti k'nın sıcaklıkla olan ilişkisi genellikle Arrhenius [21] denklemi ile ifade edilir.

$$k=V \exp (-E_a /RT) \quad (2.3)$$

Burada; E_a aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti (8,314 J/mol), T sıcaklık (K) dir. Denklemin logaritması,

$$\ln k = \ln V - E_a / RT \quad (2.4)$$

Burada; V frekans faktörü, E_a aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti (8,314 J/mol), T sıcaklık (K) dir.

Yapılan hesaplamalar sonucu 10 gün doğal yaşlanan SNA10 numunesindeki η' fazının tek boyutlu büyüdüğü ve yüzeysel çekirdeklenme olduğu bulunmuştur. Kriyojenik işlem sonrası 10 gün doğal yaşlanan CNA10 numunesinin η' fazının ise 2 boyutlu büyüme ile büyüdüğü ve hacimsel çekirdeklendiği görülmüştür. 100 gün sonra hem kriyojenik ile doğal yaşlanan hem de sadece doğal yaşlanan numunelerdeki η' fazının tek boyutlu büyüdüğü ve yüzeysel çekirdeklenme olduğu gözlemlenmiştir. Buradan kriyojenik işlemin ilk 10 günlük süreçte etkin olduğu görülmüştür. CNA10 numunesinde hem kriyojenik sıcaklığın etkisiyle hem 2 boyutlu büyümenin olmasıyla boşlukların yapı içerisinde azaldığı düşünülmektedir. JMA ile elde edilen aktivasyon enerjisinin en yüksek CNA10 numunesinde olması boşlukların azalmasıyla difüzyonunun daha yavaş gerçekleşeceğini desteklemektedir [22].

Tablo 1. JMA ve Ozawa denklemi ile hesaplanan avrami parametresi

| Numuneler | JMA ile n | Ozawa ile n |
|-----------|-----------|-------------|
| SNA10 | 1,18 | 1,04 |
| SNA100 | 0,83 | 0,82 |
| CNA10 | 1,88 | 1,73 |
| CNA100 | 0,92 | 0,87 |

Tablo 2. Numunelerdeki η' fazının n değerine bağlı büyüme ve çekirdeklenme mekanizmaları

| Kristallenme mekanizması | | |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|
| n | Büyüme mekanizması | Çekirdeklenme mekanizması |
| 4 | Üç boyutlu büyüme | Hacim çekirdeklenmesi |
| 3 | İki boyutlu büyüme | Hacim çekirdeklenmesi |
| 2 | Tek boyutlu büyüme | Hacim çekirdeklenmesi |
| 1 | Tek boyutlu büyüme | Yüzeysel çekirdeklenmesi |

4.SONUÇLAR

Bu çalışmada 7075 Al alaşımına belirli sürelerde doğal yaşlanma ve kriyojenik+doğal yaşlanma işlemi uygulanarak izotermal ve izotermal olmayan yöntemlerle avrami parametresine etkisi incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 10 gün ve 100 gün doğal yaşlanma ile SNA10 ve SNA100 numunelerinin tek boyutta büyüdüğü yüzeysel çekirdeklendiği bulunmuştur.
- Kriyojenik işlem sonrası 10 gün doğal yaşlanan CNA10 numunesin 2 boyutta büyüdüğü ve hacimsel çekirdeklendiği hesaplanmıştır.
- CNA10 numunesinin avrami parametresi en yüksektir.
- Kriyojenik işlemin büyüme ve çekirdeklenme mekanizmasına etkisi 10 günlük doğal yaşlanma sonunda etkinliğini azalttığı görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Programı tarafından desteklenmiştir (Proje No FYL-2021-7393). Mali destekleri ve laboratuvar olanaklarının sağlanması için Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Starke Jr, E. A., & Staley, J. T. (1996). Application of modern aluminum alloys to aircraft. *Progress in aerospace sciences*, 32(2-3), 131-172.
- [2] Altuntaş, G., Altuntaş, O., & Bostan, B. (2021). Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(12), 3025-3033.
- [3] Altuntaş, G., & Bostan, B. (2022). Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment. *Kovove Materialy*, 60(4).
- [4] Ringer, S. P., & Hono, K. (2000). Microstructural evolution and age hardening in aluminium alloys: atom probe field-ion microscopy and transmission electron microscopy studies. *Materials characterization*, 44(1-2), 101-131.
- [5] Altuntaş, G., & Bostan, B. Al–Zn–Mg–Cu Alaşımının Kristalografisine RRA Isıl İşlemi Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1-1.
- [6] Celotto, S. T. E. M. (2000). TEM study of continuous precipitation in Mg–9 wt% Al–1 wt% Zn alloy. *Acta materialia*, 48(8), 1775-1787.
- [7] Singh, S. S., Loza, J. J., Merkle, A. P., & Chawla, N. (2016). Three dimensional microstructural characterization of nanoscale precipitates in AA7075-T651 by focused ion beam (FIB) tomography. *Materials Characterization*, 118, 102-111.
- [8] Maloney, S. K., Hono, K., Polmear, I. J., & Ringer, S. P. (1999). The chemistry of precipitates in an aged Al-2.1 Zn-1.7 Mg at.% alloy. *Scripta Materialia*, 41(10), 1031-1038.
- [9] Altuntaş, O. Enhancement of impact toughness properties of Al 7075 alloy via double aging heat treatment. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 194-202.
- [10] Viana, F., Pinto, A. M. P., Santos, H. M. C., & Lopes, A. B. (1999). Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 54-59.
- [11] Deschamps, A., Livet, F., & Brechet, Y. (1998). Influence of predeformation on ageing in an Al–Zn–Mg alloy—I. Microstructure evolution and mechanical properties. *Acta materialia*, 47(1), 281-292.
- [12] Degischer, H. P., Lacom, W., Zahra, A., & Zahra, C. Y. (1980). Decomposition processes in an Al-5% Zn-1% Mg alloy. *International Journal of Materials Research*, 71(4), 231-238.
- [13] Li, X. Z., Hansen, V., Gjønnes, J., & Wallenberg, L. R. (1999). HREM study and structure modeling of the η' phase, the hardening precipitates in commercial Al–Zn–Mg alloys. *Acta materialia*, 47(9), 2651-2659.
- [14] Maloney, S. K., Hono, K., Polmear, I. J., & Ringer, S. P. (2001). The effects of a trace addition of silver upon elevated temperature ageing of an Al–Zn–Mg alloy. *Micron*, 32(8), 741-747.
- [15] Hansen, V., Stiller, K., Gjønnes, J., & Li, X. Z. (2002). Structures and transformations during artificial aging of an industrial 7xxx-Series Al-Zn-Mg-Zr alloy. In *Materials Science Forum* (Vol. 396, pp. 815-820). Trans Tech Publications Ltd.

- [16] Buha, J., Lumley, R. N., & Crosky, A. G. (2008). Secondary ageing in an aluminium alloy 7050. *Materials Science and Engineering: A*, 492(1-2), 1-10.
- [17] Viana, F., Pinto, A. M. P., Santos, H. M. C., & Lopes, A. B. (1999). Retrogression and re-ageing of 7075 aluminium alloy: microstructural characterization. *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 54-59.
- [18] Ranganatha, R., Kumar, V. A., Nandi, V. S., Bhat, R. R., & Muralidhara, B. K. (2013). Multi-stage heat treatment of aluminum alloy AA7049. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(6), 1570-1575.
- [19] Ozawa, T. (1970). Kinetic analysis of derivative curves in thermal analysis. *Journal of thermal analysis*, 2(3), 301-324.
- [20] Weinberg, M. C., Birnie III, D. P., & Shneidman, V. A. (1997). Crystallization kinetics and the JMAK equation. *Journal of non-crystalline solids*, 219, 89-99.
- [21] Laidler, K. J. (1984). The development of the Arrhenius equation. *Journal of chemical Education*, 61(6), 494.
- [22] Sunwoo, Anne. "Diffusion bonding of aluminium alloy, 8090." *Scripta Metallurgica et Materialia*; (United States) 31.4 (1994).



Investigation of Engineering Properties of Self-Compacting Concretes Produced with Different Mineral Additives

Emriye ÇINAR RESULOĞULLARI^{1,*} Behçet DÜNDAR²

^{1,2}Osmaniye Korkut Ata University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, 08000, Merkez/OSMANIYE

Article Info

Research article
Received: 23.09.2022
Revision: 13.10.2022
Accepted: 14.10.2022

Keywords

Fly Ash
Self-Compacting Concrete
Marble Powder
Engineering Properties

Abstract

In this study, Self-Compacting Concrete (SSC) was produced by using Fly Ash (FA) and Marble Powder (MP), which reduces the amount of cement, causes less damage to the environment and has some superior properties compared to normal concrete. The changes in the physical and mechanical properties of the produced SSCs with increasing age were investigated. CEM I 42.5 R cement was used as a binder in the production of SSC. It was used with FA and MP cement at the rates of 10%, 20% and 30% by weight. In general, a high percentage of powder material is needed in the production of SSC. Instead of obtaining the required amount of powder material from binder material, Stone Dust (SD) was preferred as filling material and hyperplasticizer additive was preferred as chemical additive. In the design of the SSC mixture, the amounts of used materials were determined in accordance with the standard. The produced SSCs were cured in the standard curing pool until the day of the experiment. 7, 28, 56 and 90 days compressive and splitting tensile strengths were determined as mechanical strength. As for the physical properties, water absorption, porosity, capillary water absorption, ultrasound pulse velocity and electrical resistivity values at 28, 56 and 90 days were determined as a result of the experiments. Moreover, it was observed that the mechanical strengths increased with the increase of concrete age, while the ideal ratio was determined as 20% for both mineral admixtures.

1. INTRODUCTION

Self-Compacting Concrete (SSC) was first used by Okamura in Japan at the end of the 22nd Century [1]. The purpose of its development is to solve the problem of difficult placement of concrete in molds due to the reinforcement placements are generally very frequent in the design of structural elements to be manufactured in Japan, especially in earthquake zones. In addition, SSC is an innovative type of concrete that can be easily placed without losing its workability, thanks to its high fluidity [2]. With the increasing needs for high strength concrete structures over time, SSC has become important research [3,4]. SSC has high machinability, cohesion resistance and does not require the use of vibration; It makes it ideal for use in high-rise buildings, bridges, tunnels, anchor blocks, prefabricated elements and reinforcement works [5-7]. SSC can be produced using the same components as regular concrete production. However, the determination of the mixing ratios of SSC should be much more sensitive than normal concrete. Compared to normal concrete, SSC mixture requires high dust content, a lower coarse aggregate content, and high superplasticizer or viscosity regulator [8]. It will be harmful for the environment and be expensive to provide the high amount of powder material used to improve the fluidity, spreading, self-compacting and segregation resistance of SSC with cement as in normal concrete. The production of concrete or SSC with cement, which is responsible for about 5% to 7% of CO₂ emissions globally, causes low environmental efficiency [9-11]. In this context, the use of materials that are less harmful to the environment and more sustainable, instead of cement with high environmental impact [12,13]. The high amount of dust contained in SCCs includes the use of various by-products or waste products instead of cement [14,15]. On the other hand, it is an effective way to reduce carbon emissions by reducing the amount of cement in SSC by using

industrial wastes instead of cement. The use of limestone dust, marble dust, fly ash, granulated blast furnace slag and metakaolin in SSC has been studied by various researchers [16-19]. Thanks to the powder materials used, the granulometry improves, the cohesion is provided better in the fresh state and increases the fullness by reducing the capillary gaps in the hardened concrete [20]. Fly ash (FA), one of the waste materials used, is a waste product obtained from coal-fueled power plants. The regular production of waste FA from thermal power plants has attracted the attention of researchers for waste disposal, and many studies have conducted to focus on substitute for cement or using that the production of cementless concrete [21-24]. Use of FA in worldwide is between 3% and 60%, but the average use is only 16% [25]. Recent studies have shown that it is possible to use up to 30% FA for more efficient SSC production, both economically and environmentally [26,27]. The use of FA in the production of concrete or SSC has a positive effect on the rheological properties, heat of hydration and crack development in hardened concrete [28]. It is an important waste material for cement reduction, especially in a special type of concrete such as SSC where the amount of powder material is required in high amounts. Another waste product used in this study is Marble Powder (MP). The marble cutting industry produces a large amount of powdered marble waste. In the cutting process of marbles, a high amount of powder in the form of slurry is produced and this material can replace fine aggregates in concrete. In the marble quarries, where the stones are cut into blocks by various methods, approximately 20-30% of the marble blocks become waste marble powder during the cutting process of these stones [29,30]. The disposal or storage of these marble wastes poses significant threats to the environment, and for this reason, it is seen that there are studies that indicate the importance of these wastes and that they should be evaluated. Considering these conditions, MP is one of the best materials to be used in concrete production, especially as a filler in SSCs or as a cement-replaced pozzolanic material [30,31].

In this study, it is aimed to investigate in detail the changes in engineering properties with the age of SSC by reducing the amount of cement by 30%, producing environmentally friendly SSCs with superior properties compared to normal concrete. For this purpose, MP, which is a waste mineral, was chosen in addition to FA, which is widely used in the literature, and two different waste mineral additives were used at rates of 10%, 20% and 30%. 7, 28, 56 and 90-day compressive and splitting tensile strengths were determined for 7 different SSC samples produced only with cement and using mineral additives at the mentioned ratios. 28, 56 and 90 days water absorption, porosity, capillary water absorption, ultrasonic pulse velocities and electrical resistivity values were determined.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Material

In this study, CEM I 42.5 R type Portland Cement conforming to TS EN 197-1 standard was used as the binder [32]. The FA used in the scope of the study complies with the F type ASTM C618-93 standard [33]. The hardness of MP used as a mineral additive is 3 on the Mohr's scale. The FA used in the study was obtained from the İSKEN Sugözü Thermal Power Plant, MP was obtained from the marble quarry in Osmaniye, and SD was obtained from the ERTAN stone quarry in Osmaniye. The physical and chemical properties of cement, MP, FA and SD used in the preparation of the mixtures are given in Table 1.

Table 1. Physical and chemical properties of Cement, FA, MP and SD

| Chemical Analysis | CEM I 42.5/R | FA | MP | SD |
|--|--------------|------|-------|------|
| SiO ₂ | 19.33 | 47.4 | 4.67 | 50.7 |
| Al ₂ O ₃ | 4.74 | 19.8 | 0.08 | 23.8 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.72 | 11.8 | 0.03 | 8.32 |
| CaO | 63.20 | 6.66 | 51.80 | 4.56 |
| MgO | 0.98 | 4.76 | 18.38 | 2.28 |
| Na ₂ O | 0.12 | 0.57 | 0.05 | 4.34 |
| Loss of Ignition | 3.94 | 2.76 | 45.98 | 2.45 |
| Specific Surface Area (cm ² /g) | 3983 | 3126 | 6740 | 3954 |
| Specific Weight (g/cm ³) | 3.12 | 2.39 | 2.63 | 2.73 |

FA: Fly Ash, MP: Marble Powder, SD: Stone Dust

Two different types of aggregates in accordance with the TS 706 EN 12620 standard were used in the production of the samples. Aggregate with 0-4 mm grain size as fine aggregate and 4-16 mm grain size as coarse aggregate was used [34]. The specific weights of crushed sand and coarse aggregate used are 2.70 gr/cm³ and 2.67 gr/cm³, respectively, and their water absorption percentages are 1.51% and 1.75%, respectively. Mixing water was used in the production of Osmaniye city tap water in accordance with TS EN 1008 standard, as well as in the curing phase [35]. Sika brand Viscocrete 4567 Hi-Tech was used as chemical additive.

2.2. Method

2.2.1. Design And Preparation of Ssc Mixing

Unlike normal concrete, SSCs must have sufficient cohesion and segregation resistance. In order to provide these properties in SSC, the amount of coarse aggregate in the concrete is used less, the water/powder material ratio is kept low, and high water reducing plasticizer chemical additives are used. Mixtures were prepared by using the limitation of mixing values recommended by the EFNARC (2005) committee in the design of the SSC [36]. In the mixtures, the dose was kept constant as 400 kg and the used FA and MP were used by replacing cement 10%, 20% and 30%. The chemical additive rate for 1 m³ SSC was kept constant as 1.85% and the amount of SD as 125 kg. The ratios of crushed sand (0-4 mm) and coarse aggregate (4-16 mm) used in the mixture were determined as 55% and 45%, respectively. In addition to series produced only with cement, which does not contain minerals. A total of 7 series of SCCs were produced by using 2 different mineral additives in 3 different ratios. Mixture amounts for 1 m³ SSC are given in Table 2.

Table 2. Required material quantities for 1 m³ SSC

| Mixture Name | Cement (kg) | Mineral Additive (kg) | Stone Dust (kg) | Water (kg) | Chemical Additive (kg) | Crushed Sand (kg) | Coarse Aggregate (kg) |
|---------------|-------------|-----------------------|-----------------|------------|------------------------|-------------------|-----------------------|
| Ref | 400 | 0 | 125 | 189 | 7.4 | 909.8 | 744.4 |
| %10 MP | 360 | 40 | 125 | 189 | 7.4 | 905.4 | 740.8 |
| %20 MP | 320 | 80 | 125 | 189 | 7.4 | 900.9 | 737.1 |
| %30 MP | 280 | 120 | 125 | 189 | 7.4 | 896.5 | 733.5 |
| %10 FA | 360 | 40 | 125 | 189 | 7.4 | 900.0 | 736.3 |
| %20 FA | 320 | 80 | 125 | 189 | 7.4 | 890.1 | 728.3 |
| %30 FA | 280 | 120 | 125 | 189 | 7.4 | 880.2 | 720.2 |

2.2.2. Experimental Procedure

Physical properties of SSCs such as water absorption, porosity, capillary and ultrasonic pulse velocities were determined at 28, 56 and 90 days, and compressive and splitting tensile strengths at 7, 28, 56 and 90 days.

Porosity and water absorption properties were determined in accordance with the TS EN 12390-7 (2010) standard with the help of a scale working with the Archimedes principle [37]. According to TS EN 772-11 (2012), capillary water absorption coefficients of concretes are determined by performing capillary water absorption test in order to have information about capillary voids [38]. Ultrasonic pulse velocities is one of the non-destructive testing methods. Ultrasonic pulse velocities gives information about concrete quality. Ultrasonic pulse velocities have been determined in accordance with the TS EN 12504-4 (2021) standard [39]. In order to be able to measure independently of the effect of humidity conditions, the resistivity of electrical conductive were measured on the samples removed from the curing pool and saturated with water by the two-plate method in accordance with the ASTM C 1760 (2021) standard [40]. The resistance was measured at 0.1, 0.12, 1 and 10 kHz at direct current. The purpose of determining the electrical resistivity at different frequencies is to determine the resistivity value that can be obtained depending on the measurement frequency. The compressive strengths of SSCs were determined in accordance with the TS EN 12390-3 (2019) standard, and the split tensile strengths were determined in accordance with the TS EN 12390-6 (2010) standard [41,42].

3.RESULTS

The 7, 28, 56 and 90 day compressive strength results of the samples are given in Figure 1. The compressive strengths of all SCCs increase with increasing concrete age. The compressive strength of the samples with FA added as a mineral additive was higher than the samples with MP added. The 7, 28, 56 and 90-day compressive strengths of the reference sample were determined as 29.53 MPa, 40.17 MPa, 50.23 MPa and 56.70 MPa, respectively. The 28-day compressive strengths of 10%FA, 20%FA and 30%FA samples were 61.2 MPa, 61.98 MPa and 59.21 MPa, respectively. The 28-day compressive strengths of 10%MP, 20%MP and 30%MP were 52.7 MPa 53.8 MPa, 56.23 MPa, respectively. The highest compressive strength of 56 days was measured as 67.82 MPa in the 20%FA sample and the lowest compressive strength was measured as 50.23 MPa in the REF sample. With the addition of mineral additives to REF concrete, it was observed that the compressive strength increased especially at 28 days and older ages. Mineral additive increases strength in later ages rather than early ages [43]. Mineral additives have to wait for the cement hydration product Ca(OH) to form an additional C-S-H gel. With the increase in the mineral additive ratio, the compressive strength increased up to 20%, while a decrease was observed with the increase to 30%. However, higher strengths were obtained compared to REF.

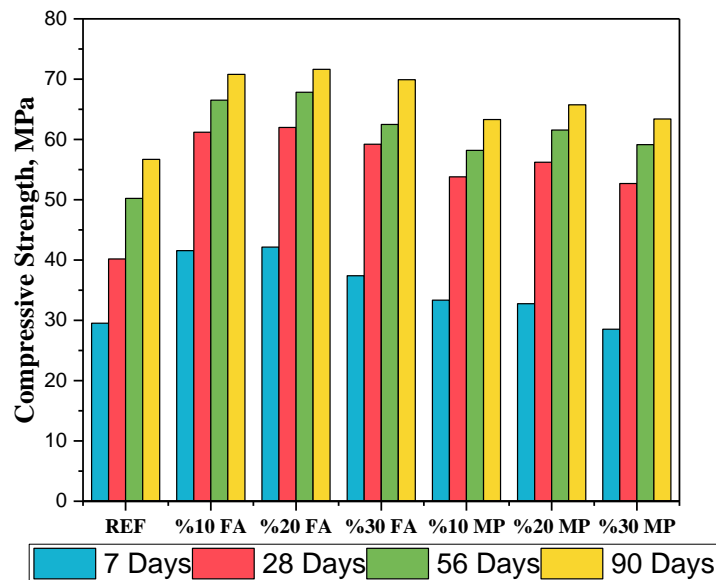


Figure 1. Compressive Strength Results

The 7, 28 and 56 days split tensile strength results of the samples are given in Figure 2. The split tensile strengths of all SSCs increase with increasing concrete age. In general, splitting concrete is neglected because it has much lower tensile strength. The split tensile strengths of SSCs were found to be low compared to the compressive strengths. However, a similar increase in split tensile strength was observed with the addition of mineral additives. The split tensile strength of the samples with FA added as a mineral additive was higher than the samples with MP added. The 7, 28, 56 and 90-day splitting tensile strengths of the reference sample were determined as 1.31 MPa, 2.56 MPa, 2.60 MPa and 2.83 MPa, respectively. The tensile strengths of 28 days 10%FA, 20% FA and 30%FA samples were 2.98 MPa, 3.50 MPa and 3.08 MPa, respectively. Tensile strengths of 10%MP, 20%MP and 30% samples were 2.98 MPa, 3.54 MPa and 2.81 MPa, respectively. The highest splitting tensile strength of 56 days was measured as 3.90 MPa in the 20%FA sample and the lowest splitting tensile strength was measured as 2.60 MPa in the REF sample. With the increase in the mineral additive ratio, the splitting tensile strengths increased up to 20%, while a decrease was observed with the increase to 30%. However, higher strengths were obtained compared to REF.

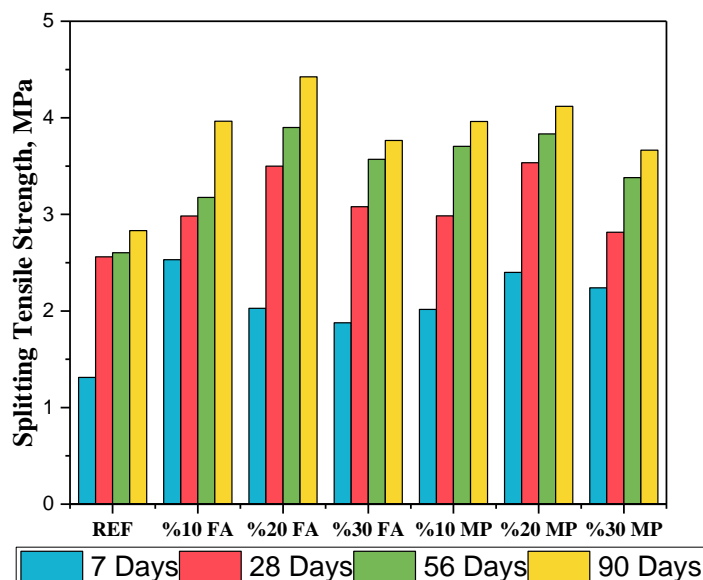


Figure 2. Split Tensile Strength Results

The 28, 56 and 90-day water absorption values of the samples are given in Figure 3, and the porosity values are given in Figure 4. The water absorption values of SSCs decreased with increasing age. As the concrete ages, additional C-S-H gels continue to form and fill the voids in SSC. Due to C-S-H gels fill the voids, the amount of water absorption also decreased [44]. The 28 and 56-day water absorption values of the REF sample were 3.81% and 3.62%, respectively. The porosity values of the REF sample at 28 and 56 days were 7.59% and 6.77%, respectively. Water absorption and porosity values decreased with the addition of mineral additives. The 28-day water absorption values of 10%FA, 20% FA and 30%FA samples were 3.36%, 3.11% and 3.65%, respectively, and the 28-day water absorption values of 10%MP, 20% MP and 30%MP samples were, respectively. 3.73%, 3.72% and 3.90%. The 28-day %10FA, %20FA, %30FA porosity values were determined as 6.72%, 6.26% and 7.28%, respectively, and the 28-day porosity values of 10%MP, 20% MP and 30% MP samples were 7.46%, 7.01% and 7.80%, respectively. The lowest water absorption value of 56 days was determined as 3.03% in the 20%FA sample and the highest as 3.90% in the 30%MP sample. The lowest porosity value of 56 days was determined as 5.73% in the 20%FA sample and the highest as 6.86% in the 30%MP sample.

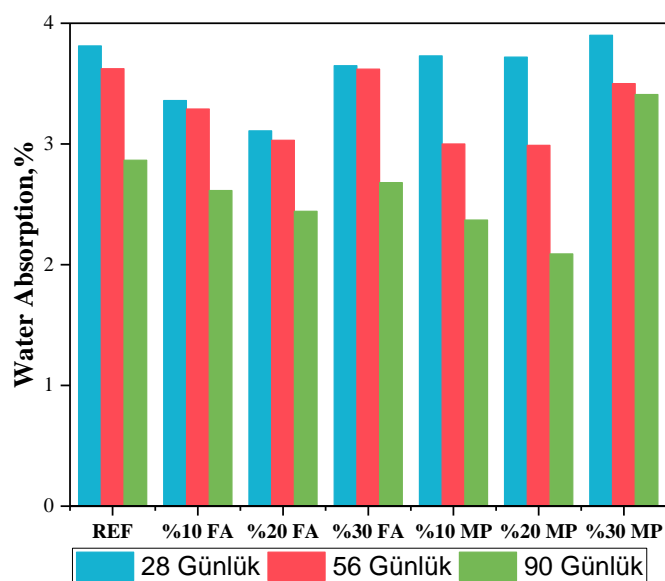


Figure 3. Water Absorption Results

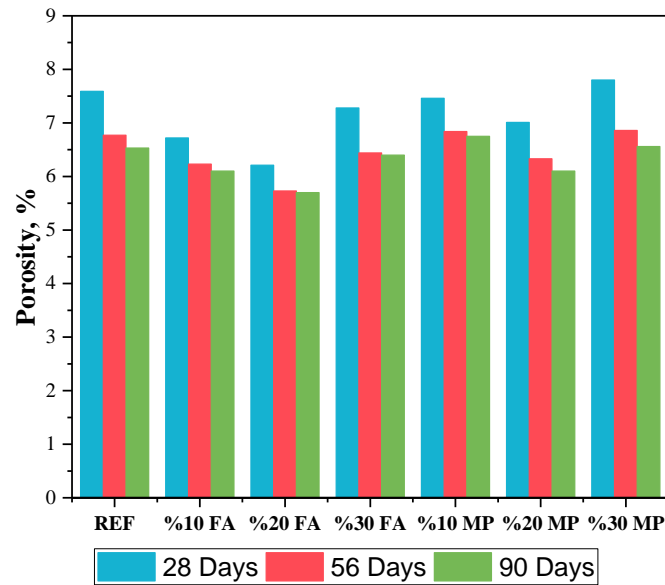


Figure 41. Porosity results

The 28-day electrical resistivity values of the samples are given in Figure 5, the 56-day electrical resistivity results in Figure 6, and the 90-day electrical resistivity results in Figure 7. All electrical resistivity measurements were measured at 4 different frequencies as 0.1 kHz, 0.12 kHz, 1 kHz and 10 kHz. In cementitious composites, electrical conductivity occurs with ion mobility in the cavity solution. The number of revolutions per second of the alternating current signal is called the frequency. With the increase in the frequency value, the ion mobility in cement-based composites accelerates and therefore the electrical resistivity decreases [45]. In all measurements, it was observed that the electrical resistivity values decreased with the increase in the frequency value. It was observed that the resistivity values increased with the addition of mineral additives. It is known that the Ca (OH) ions that emerge as a result of cement hydration with the use of mineral additives bind and are converted into C-S-H gels. Ion reduction with the use of mineral additives decreased the electrical conductivity and increased the electrical resistivity values.

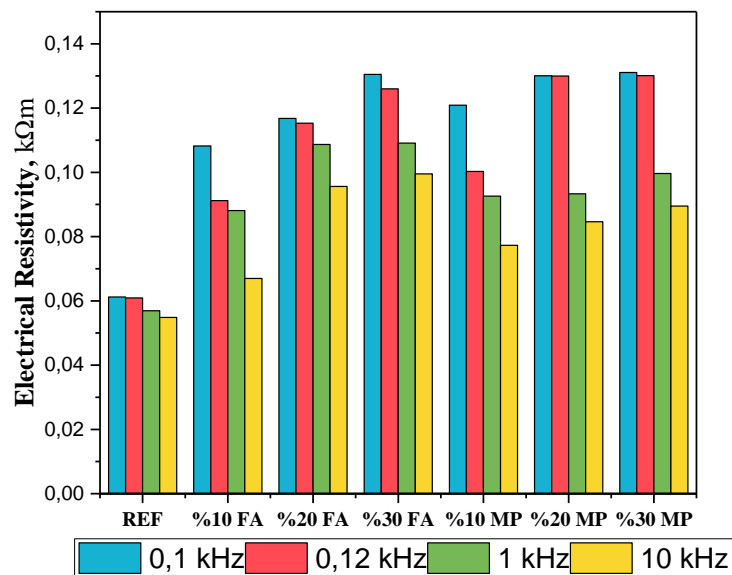


Figure 5. 28-Day Electrical Resistivity Results measured at different frequency values

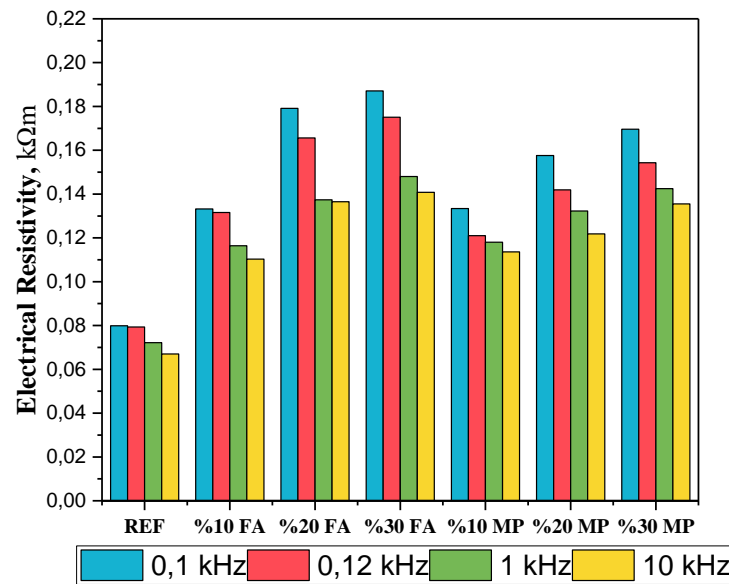


Figure 6. 56-Day Electrical Resistivity Results measured at different frequency values

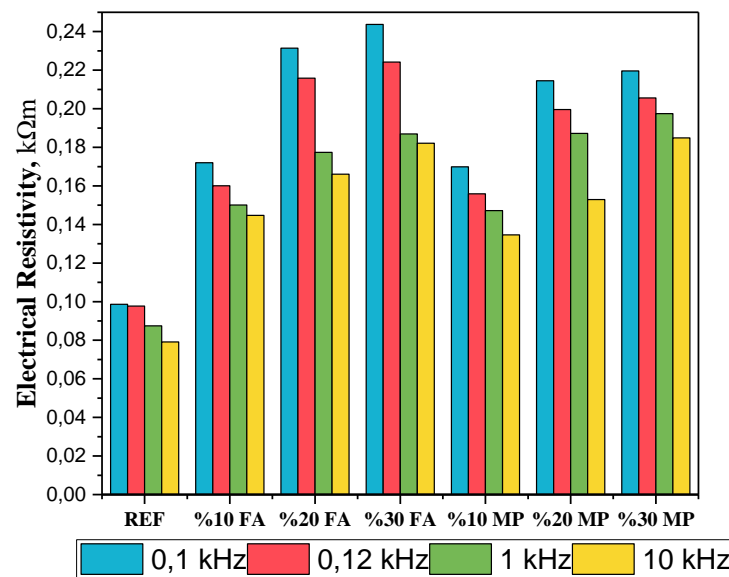


Figure 7. 90-Day Electrical Resistivity Results measured at different frequency values

Capillary water absorption coefficients of the samples at 28, 56 and 90 days are given in Figure 8. It was observed that capillary water absorption coefficients decreased with increasing SSC age. Although the cement reaches its final strength on the 28th day, hydration continues. With continued hydration, additional C-S-H gels form and fill the capillary spaces in the SSC [46]. It has been observed that capillary voids are reduced with the use of mineral additives, thanks to the high powder content of SSC and different mineral content. It is known that there is a reaction in the use of mineral additives, not at early ages, but at later ages. The reason for this is that the mineral additives are waiting for the calcium hydroxides that will be formed as a result of cement hydration. It has been observed that the use of mineral additives causes fewer voids than the use of cement alone. The use of FA was found to fill capillary space better than the use of MP.

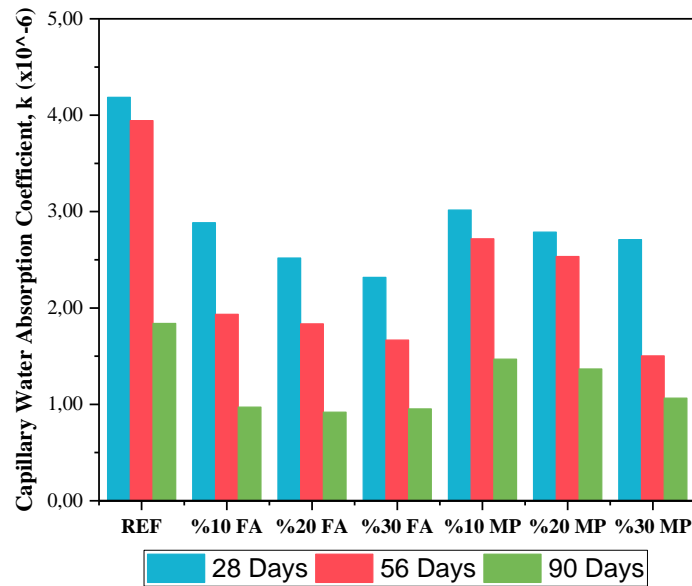


Figure 8. Capillary water absorption coefficient results

The 28, 56 and 90 day ultrasonic pulse velocities results of the samples are given in Figure 9. Ultrasonic pulse velocities is one of the non-destructive test methods that gives information about the void structure of building composite materials such as concrete. The smaller the gap, the faster the transmitted sound wave will pass through the SSC. A high ultrasonic pulse velocities means that the void ratio of SSC is low and therefore its mechanical strength is also high [47,48,49]. When the ultrasonic pulse velocities results of SSCs were examined, it was observed that ultrasound pulse velocities increased with the increase of concrete age. As the concrete ages, it continues to gain strength and fills the voids with additional hydration products with the pozzolanic effect. It was observed that the ultrasonic pulse velocities increased at all ages with the addition of mineral additives. It was observed that SSC shows similar behavior to other physical behaviors performed within the scope of this study.

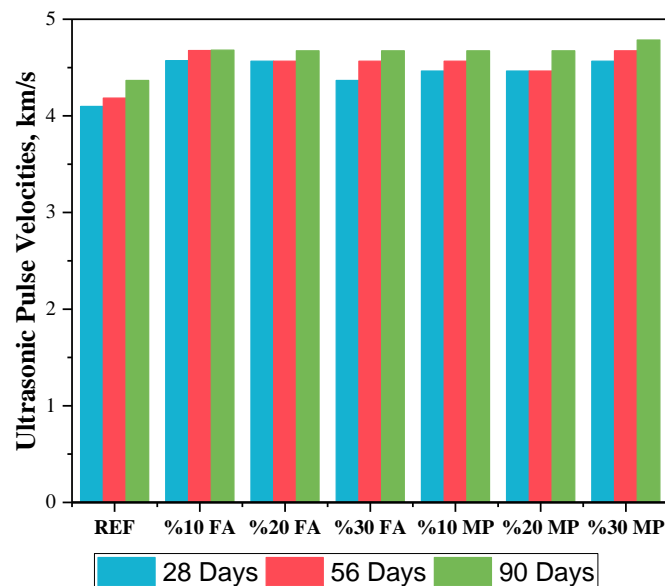


Figure 9. Ultrasonic pulse velocities results

4.CONCLUSIONS

The 7, 28, 56 and 90-day engineering properties results of SSCs produced using FA and MP minerals are as follows:

- With the increase of SSC age, compressive and splitting tensile strengths increase, and with the use of mineral additives, higher strengths have been determined compared to the REF sample produced only with cement, especially at later ages.
- When the 28-day compressive strengths were examined, an increase of 54.29% with the use of 20%FA and an increase of 39.98% with the use of 20% MP were observed compared to the REF sample.
- When the split tensile strengths of 28 days were examined, an increase of 37.89% was observed with the use of 20%FA compared to the REF sample, and an increase of 36.71% with the use of 20% MP.
- It was observed that the compressive and splitting tensile strengths of the samples with FA added as mineral additives were higher than the samples with MP added.
- When the water absorption and porosity values were examined, it was seen that these values decrease with the addition of mineral additives. The lowest water absorption and porosity values were determined by 20% for both minerals.
- As a result of the electrical resistivity measurements taken at 4 different frequency values, it was observed that the electrical resistivity decreased with the increase in frequency and it increased with the increase in age.
- It was determined that ion mobility and electrical resistivity values decreased with the addition of mineral additives.
- When the capillary water absorption coefficients were examined, it was seen that they show parallelism with water absorption and porosity. Both the increase in age and the addition of mineral additives resulted in lower capillary water absorption coefficients by reducing the capillary voids of SSCs.
- Ultrasound pulse velocities increase with both SSC age and the addition of mineral additives. Ultrasound pulse velocities results showed that with the addition of mineral additives to SSC, the void ratio would decrease and a fuller SSC would be obtained.
- It has been concluded that by reducing the amount of cement with the use of mineral additives in SSCs, both environmentally friendly and better physical and mechanical properties can be gained compared to SSCs produced only with cement. It has been determined that the ideal ratio for both mineral additives is 20%.

It has been concluded that the expected physical and mechanical properties are met with the use of waste mineral additives by reducing the amount of cement as intended in the production of SSC. In the use of waste mineral additives up to 20%, better properties have been observed than SSC produced only with cement. Environmentally friendly SSC has been produced, which both emits less CO₂ to the environment and ensures waste disposal.

REFERENCES

- [1] Okamura, H. "Self-compacting high-performance concrete," Concrete international, vol. 19 no. 7, pp. 50-54, 1997.
- [2] Cengiz, S. , Kamanlı, M. & Ünal, A. Investigation of flexural behavior of reinforced concrete beams produced with self compacting and normal concrete. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8 (2), 429-438 (2020).
- [3] Kefelegn, A., Gebre, A. Performance of self-compacting concrete used in congested reinforcement structural element, Eng. Struct. 214 (2020), 110665, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110665>.
- [4] Liu, Y., Hou, S., Li, C., Zhou, H., Jin, F., Qin, P., Yang, Q. Study on support time in double-shield TBM tunnel based on self-compacting concrete backfilling material. Tunn. Undergr. Sp. Technol. 96 (2020), 103212, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103212>.

- [5] Zhu, P., Xu, X., Liu, H., Liu, S., Chen, C., Jia, Z. Tunnel fire resistance of selfcompacting concrete coated with SiO₂ aerogel cement paste under 2.5 h HC fire loading. *Constr. Build. Mater.* 239 (2020) 117857. [10.1016/j.conbuildmat.2019.117857](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117857).
- [6] Salesa, A., J.A. P´erez-Benedicto, L.M. Esteban, R. Vicente-Vas, M. Orna-Carmona, Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects, *Constr. Build. Mater.* 153 (2017) 364–373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.087>.
- [7] Zamri, N.F., Mohamed, R.N., Elliott, K.S. Shear capacity of precast half-joint beams with steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Constr. Build. Mater.* 272 (2021) 121813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121813>.
- [8] Krishna Murthy. N, Narasimha Rao A.V, Ramana Reddy I. V and Vijaya Sekhar Reddy. M. Mix Design Procedure for Self-Compacting Concrete. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, 2 (9) September (2012).
- [9] Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. *Concreto: propriedades e materiais*, IBRACON (2014). repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/377/1/EdvaldoMonteiroLisboa_Capa_Cap2.pdf.
- [10] Bacarji, E., Toledo Filho, R.D., Koenders, E.A.B., Figueiredo, E.P., Lopes, J.L.M.P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. *Constr. Build. Mater.* 45 (2013) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.032>.
- [11] Silva, M.C. Dimensionamento de pilar-parede considerando o aumento da resistˆencia a ` compressˆao do concreto, Universidade Estadual de Maring´a, Dissertaç˜ao (mestrado), (2018).
- [12] Cabrera, M., Martinez-Echevarria, M.J., Lopez-Alonso, M. Agrela, F., Rosales, J. Selfcompacting recycled concrete using biomass bottom ash, *Materials* 14 (20) (2021) 6084.
- [13] Bu`si´c, R., Mili`cevi´c, I., Sipo, T., StrFAar, K. Recycled rubber as an aggregate replacement in self-compacting concrete-literature overview, *Materials* 11 (9) (2018) 1729.
- [14] Kapoor, K., Singh, S.P., Singh, B. Evaluating the durability properties of self compacting concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 24 (14) (2020) 2383–2399.
- [15] Abed, M., de Brito, J. Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by nondestructive testing. *J. Build. Eng.* 32 (2020) 101720.
- [16] Felekoglu B. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). *Resour Conserv Recycl*, 51, (2007)770–91.
- [17] Bosiljkov, V.B., Duh, D. and Zarnic, R. Time evolution of properties of SCC mixtures produced using crushed limestone aggregate and high content of limestone filler, design, production and placement of self-consolidating concrete. *Rilem Bookseries*,1, (2010) 317–27.
- [18] Uysal, M. and Yilmaz, K. Effect of mineral admixtures on properties of selfcompacting concrete. *Cement Concr Comp*, 33, (2011) 771–6.
- [19] Vejmekova, E., Keppert, M., Grzeszczyk, S., Bartłomiej, S. and Cerny, R. Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag. *Constr Build Mater*, 25, (2011)1325–31.
- [20] Derabla, R. and Benmalek, M.L. Characterization of heat-treated self-compacting concrete containing mineral admixtures at early age and in the long term. *Construction and Building Materials*, 66, (2014) 787–794.

- [21] Long, G., Gao, Y., Xie, Y. Designing more sustainable and greener self-compacting concrete, *Construct. Build. Mater.* 84 (2015) 301–306, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.072>
- [22] Ahari, R.S., Erdem, T.K., Ramyar, K. Thixotropy and structural breakdown properties of self consolidating concrete containing various supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Compos.* 59 (2015) 26–37, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.009>.
- [23] Ponikiewski, T., Gołaszewski, J. The influence of high-calcium fly ash on the properties of fresh and hardened self-compacting concrete and high performance self-compacting concrete, *J. Clean. Prod.* 72 (2014) 212–221, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.058>.
- [24] Ma, C., Zhao, B., Guo, S., Long, G., Xie, Y. Properties and characterization of green one-part geopolymer activated by composite activators, *J. Clean. Prod.* 220 (2019) 188–199, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.159>
- [25] Ponikiewski, T., Gołaszewski, J. The effect of high-calcium fly ash on selected properties of self-compacting concrete, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 14 (2014) 455–465, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.10.014>.
- [26] Singh, N., Kumar, P., Goyal, P. Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self compacting concrete, *J. Build. Eng.* 26 (2019), 100882, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100882>.
- [27] Zhou, S., Ma, C., Long, G., Xie, Y. A novel non-Portland cementitious material: mechanical properties, durability and characterization, *Construct. Build. Mater.* 238 (2020), 117671, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117671>.
- [28] Canpolat, F. The role of coal combustion by-products in sustainable construction materials, *Indian Concr. J.* 86 (6) (2011) 26–38.
- [29] Patankar, S.V., Ghugal, Y. M., Jamkar, S. S. Mix design of fly ash based geopolymer concrete. In *Advances in Structural Engineering* (pp. 1619-1634) (2015) Springer, New Delhi.
- [30] Rai, P., Pei, H., Meng, F. Ahmad, M. Utilization of Marble Powder and Magnesium Phosphate Cement for Improving the Engineering Characteristics of Soil. *Int. J. of Geosynth. and Ground Eng.* 6, 31 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00212-3>
- [31] Prarthitaet, B.A.S.U., Gupta, R. C., Agrawal, V Mix design of selfcompacting concrete–A new approach (2018).
- [32] Tayeb, B., Abdelbaki, B., Madani, B., Mohamed, L. Effect of marble powder on the properties of self-compacting sand concrete. *The Open construction and building technology journal*, 5(1) (2011).
- [33] TS EN 197-1, Cement – Part 1: Composition, specification and conformity criteria for common cements, TSE, Ankara, Turkey (2012).
- [34] ASTM C 618-93, Standard Test Method for Fly Ash, Manual book of ASTM volume 04.02, 93, USA (1991).
- [35] TS 706 EN 12620+A1, Aggregates for concrete, TSE, Ankara, Turkey (2009).
- [36] TS EN 1008, Mixing water for concrete - Specifications for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, TSE, Ankara, Turkey (2003).
- [37] EFNARC (2005). *The European Guidelines for Self Compacting Concrete - Specification, production and use*, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems (EFNARC), May, 2005, pp. 68.

- [38] TS EN 12390-7, Testing hardened concrete - Part 7: Density of hardened concrete, TSE, Ankara, Turkey (2021).
- [39] TS EN 772-11, Methods of test for masonry units - Part 11: Determination of water absorption of aggregate concrete, autoclaved aerated concrete, manufactured stone and natural stone masonry units due to capillary action and the initial rate of water absorption of clay masonry units, TSE, Ankara, Turkey (2012).
- [40] TS EN 12504-4, Testing concrete in structures - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity, TSE, Ankara, Turkey (2021).
- [41] ASTM C1760, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete (2021)
- [42] TS EN 12390-3. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens, TSE, Ankara, Turkey (2019).
- [43] TS EN 12390-6, Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens TSE, Ankara, Turkey (2010).
- [44] Kaszynska, M., Skibicki, S. Influence of Eco-Friendly Mineral Additives on Early Age Compressive Strength and Temperature Development of High-Performance Concrete. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2017), 95 (2017) 042060.
- [45] Kong, D., He, G. Pan, H., Weng, Y., Du, N., Sheng, J., Influences and Mechanisms of Nano-C-S-H Gel Addition on Fresh Properties of the Cement-Based Materials with Sucrose as Retarder. Materials, 13 (2020) 2345.
- [46] Uygunoğlu, T., Topçu, İ.B., Şimşek, B., Çınar, E. Kendiliğinden Yerleşen Harçların Elektriksel Özdirenci Üzerine Mineral Katkıların Etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 22(2) (2018) 986-992.
- [47] Ge, Z.; Wang, K.; Sun, R.; Huang, D.; Hu, Y. Properties of self-consolidating concrete containing nano-CaCO₃. J. Sustain. Cem. Based Mater. 3 (2014) 191–200.
- [48] Yasar, E., Erdogan, Y., Kılıç, A. Effect of limestone aggregate type and water cement ratio on concrete strength. Mater. Lett. 58 (5) (2004) 772-777. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2003.06.004>
- [49] Çınar, E., Dündar, B., Uygunoğlu T. Investigation on High-Temperature Effect of Recycled Concrete Aggregate on Mortars. Materials International, 2 (2) (2020) 236-24.
- [50] Yurt, Ü., Emiroğlu, M., Kendiliğinden Yerleşen Betonların Düşük Sıcaklıklardaki Davranışının Tahribatsız Yöntemlerle İncelenmesi. Academic Platform Journal of Engineering and Science, 6 (3) (2018) 08-15.

Using Digital Twin Technology in Production Planning and Control Process: An Application in Textile Industry

Aysel KOÇAK¹,  Aytaç YILDIZ², * 

¹Bursa Technical University, Graduate School of Education, Intelligent Systems Engineering, 16310, Yildırım/BURSA

²Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, 16310, Yildırım/BURSA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 2.09.2022
Revision: 13.10.2022
Accepted: 15.10.2022

Highlights

- JSON.
- MongoDB.
- Location Services.

Keywords

Industry 4.0
Digital twin
Intelligent manufacturing
Garment industry

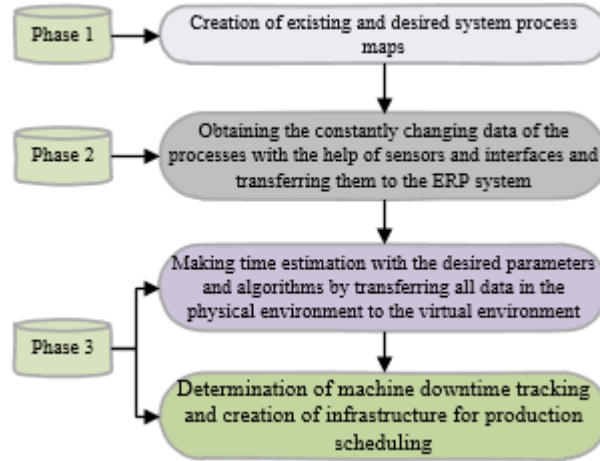


Figure A. The architecture of the developed system

Purpose: In the study, it is aimed to create the infrastructure of digital twin studies that will help analyze the production from every aspect by creating a virtual copy of the physical environment within the scope of the data digitization project of a company that is leading company operating in the garment industry.

Theory and Methods: In the study, the creation of existing and desired system process maps, ensuring that all data are kept in the database with interfaces, and the establishment of the desired physical and virtual system consisted of three phases. In the first phase, maps were created for all processes using the ensemble platform. In the second phase, the forms, programs, instructions and users used in the processes were examined and an ERP system was created to keep the data in the processes in the database. In the last phase, using the data generated in the system, the production time of the products was estimated with four different estimation algorithms in the Knime platform.

Results: A large amount of data has been obtained by transferring all processes to the ERP system. Using these data, the production time was estimated and the results obtained from the random forest regression model were determined as the most appropriate. Therefore, this model is integrated into the ERP system module. Machine downtime was tracked, thus ensuring efficient operation of the machines and the necessary infrastructure for production scheduling was established.

Conclusion: In this study, infrastructure studies have been created for a system that can decide on its own, and it is aimed to direct the work and production of the model in the virtual environment by processing the data taken from the physical environment in the following processes.



Using Digital Twin Technology in Production Planning and Control Process: An Application in Textile Industry

Aysel KOÇAK¹, Aytaç YILDIZ² *

¹Bursa Technical University, Graduate School of Education, Intelligent Systems Engineering, 16310, Yıldırım/BURSA

²Bursa Technical University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Industrial Engineering, 16310, Yıldırım/BURSA

Abstract

In this study, it is aimed to examine the processes from end to end within the scope of the data digitization project in the production facility of a leading company operating in the garment industry and to make data-oriented process designs using new generation information technologies. Accordingly, it is targeted to create the necessary process infrastructures for making digital twin models, which is a newly developing and rapidly growing technology. In the study, first of all, process maps were created and the constantly changing data of the processes were obtained with the help of sensors and interfaces and transferred to the system. Then, by establishing a connection between the process-based times taken from the machines on the production line and the characteristics of the product to be produced, how long it will take for any product to be completed when it enters the process was estimated on the Knime platform using linear regression, polynomial regression, gradient boosting decision forest regression and random forest regression algorithms. According to the estimation results, it was determined that the random forest regression model had the highest R^2 and lowest error metric values, and this regression model was integrated into the ERP infrastructure. In addition, a production scheduling study was designed according to the estimated production times and various parameters on the line. The study is important in terms of establishing the infrastructure of a intelligent system that can decide on its own, and it is anticipated that it will contribute to the creation of the digital twins of the processes.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 2.09.2022
Düzeltilme: 13.10.2022
Kabul: 15.10.2022

Keywords

Industry 4.0
Digital twin
Intelligent manufacturing
Garment industry

Anahtar Kelimeler

Endüstri 4.0
Dijital ikiz
Akıllı üretim
Hazır giyim sektörü

Üretim Planlama ve Kontrol Süreçlerinde Dijital İkiz Teknolojisinin Kullanılması: Tekstil Sektöründe Bir Uygulama

Öz

Bu çalışmada, hazır giyim sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın üretim tesisinde, veri dijitalleştirme projesi kapsamında süreçlerin uçtan uca incelenmesi ve yeni nesil bilgi teknolojileri kullanılarak veri odaklı süreç tasarımlarının yapılması amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak, yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz modellerinin yapılabilmesi için gerekli olan süreç altyapılarının oluşturulması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada ilk olarak, süreç haritaları oluşturulmuş ve süreçlere ait sürekli değişen verilerin sensörler ve arayüzler yardımıyla elde edilerek sisteme aktarılması sağlanmıştır. Daha sonra, üretim hattındaki makinelerden alınan süreç bazlı süreler ile üretilecek ürüne ait nitelikler arasında bağlantı kurularak, herhangi bir ürünün sürece girdiğinde ne kadar sürede tamamlanacağı lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli karar ormanı regresyonu ve rassal orman regresyon algoritmaları kullanılarak Knime platformunda tahmin edilmiştir. Yapılan tahmin sonuçlarına göre rassal orman regresyon modelinin, en yüksek R^2 ve en düşük hata metrik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiş ve bu regresyon modeli ERP altyapısına entegre edilmiştir. Ayrıca, tahmin edilen üretim süreleri ve hat üzerindeki çeşitli parametrelere göre üretim çizelgeleme çalışması tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışma, kendi kendine karar verebilen akıllı bir sistemin altyapısının oluşturulması bakımından önemli olup süreçlerin dijital ikizlerinin oluşturulmasında katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstri 4.0 devrimiyle ortaya çıkan bilgi ve iletişim teknolojileriyle birlikte büyük veri odaklı ürün tasarımları ve üretimleri dönemine gelinmiştir [1]. Bu dönemde, şirketlerin verileri kullanarak üretimlerini akıllı hale getirmeleri için üretim süreçleriyle bu teknolojilerini entegre etmeleri aşamalarında akıllı ara bağlantı, akıllı etkileşim, akıllı kontrol ve yönetim dahil olmak üzere bir dizi akıllı operasyon gerçekleştirmeleri gerekmektedir [2, 3]. Burada, temel bir üretim birimi olarak, sadece akıllı üretimin zorunlu talebi değil, aynı zamanda fiziksel ve sanal alanlar arasındaki etkileşim ve entegrasyonu sağlamak için bir teknoloji tabana ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Bu bağlamda, gittikçe daha fazla işletme tarafından benimsenen bir kavram olan siber-fiziksel entegrasyona ulaşmak için yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz teknolojisi benzersiz bir kolaylık sağlamaktadır [4, 5]. Dijital ikiz, ürünün gerçek fiziksel dünyadaki davranışlarını sergileyen sanal bir kopyasıdır. Sorunları tespit etmeye, yeni ayarları test etmeye, her türlü senaryoyu simüle etmeye, analiz edilmesi gereken şeyleri analiz etmeye, aslında hemen hemen fiziksel dünyada yapılmasına ihtiyaç duyulan her şeyin sanal ürün üzerinde yapılmasına yardımcı olmaktadır. Dijital ikiz esasen, herhangi bir fiziksel sistemin yapısını, bağlamını ve davranışını temsil eden verilerle, geleceğe yönelik öngörüler yapmayı sağlayan bir arayüz sunmaktadır. Bunlar, fiziksel dünyayı optimize etmek için kullanılabilir, operasyonel performansı ve iş süreçlerini önemli ölçüde geliştiren çok güçlü dijital nesnelere. Ek olarak, bizler için fiziksel ve dijital dünya arasındaki köprüdür [6]. Dijital ikiz, süreçlere ait gerçek verileri kullanarak sanal ortamlar oluşturur ve hem ürünlerin hem de süreçlerin etkili bir şekilde yürütülmesinde kolaylıklar sağlamaktadır. Süreçlerin ya da ürünlerin dijital ikizlerinin oluşturulmasındaki en önemli aşamalardan biri tasarım, üretim, dağıtım, kullanım, bakım, yükseltme ve geri dönüşüm dahil olmak üzere bir ürünün yaşam döngüsünün farklı aşamalarında oluşan verilerin toplanması ve işlenmesidir [3].

Bundan dolayı bu çalışmada, hazır giyim perakende sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın veri dijitalleştirme projesi kapsamında, fiziksel ortamın sanal kopyasının oluşturulması ile üretimi her yönden analiz etmeye yardımcı olacak dijital ikiz çalışmalarının altyapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun için, mevcut ve olması istenen sistem süreç haritaları oluşturulmuş, tüm verilerin arayüzler ile veri tabanında tutulması sağlanmış, Knime platformu aracılığıyla dört farklı regresyon algoritması kullanılarak süre tahminlemesi yapılmış ve son olarak makine duruş takibi ve üretim çizelgeleme için başlangıç aşaması çalışması yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın bundan sonraki bölümünde Endüstri 4.0 ve dijital ikiz teknolojisi anlatılmış, üçüncü bölümde çalışmada kullanılan materyal ve metod açıklanmış, dördüncü bölümde çalışmadan elde edilen bulgulara yer verilmiş ve son bölümde değerlendirmeler yapılmıştır.

2. ENDÜSTRİ 4.0 VE DİJİTAL İKİZ (INDUSTRY 4.0 AND DIGITAL TWIN)

Endüstri 4.0'ın temelini; nesnelere internet (Internet of Things-IoT), büyük veri analitiği, siber güvenlik, bulut bilişim, artırılmış gerçeklik, simülasyon, otonom robotlar, eklemeli (katmanlı-3B) imalat gibi teknolojiler oluşturmaktadır [7, 8]. Bununla birlikte, akıllı üretime ulaşmak için üretim dünyası ile teknolojilerin entegre edilmesi zorluklardan birisidir. Bu entegreyi sağlayabilmek için sanal dünya, akıllı ara bağlantı, akıllı etkileşim, akıllı kontrol ve yönetim, vb. dahil olmak üzere bir dizi akıllı operasyonun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, fiziksel ve sanal alanlar arasındaki etkileşim ve entegrasyonu sağlamak için bir teknolojik tabana ihtiyaç duyulmaktadır [3]. Gittikçe daha fazla işletme tarafından benimsenen bir kavram olan siber-fiziksel entegrasyona ulaşmak için dijital ikiz teknolojisi benzersiz bir yol sağlamaktadır [5].

2.1. Dijital İkiz (Digital Twin)

Sanayi ve ürün tasarımında yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte, büyük veri odaklı ürün ve süreç tasarımı dönemi başladı. Buna bağlı olarak, fiziksel ve sanal dünyayı birbirine bağlayan, yeni gelişen ve hızlı büyüyen bir teknoloji olan dijital ikiz kavramı ortaya çıkmıştır [9]. NASA'nın işleme teknolojisi sonucunda ortaya çıkan dijital ikiz teknolojisi ilk olarak Grieves'in 2003 yılında Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (PLM) hakkındaki sunumunda ifade edilmiştir [10]. NASA tarafından geliştirilen dijital

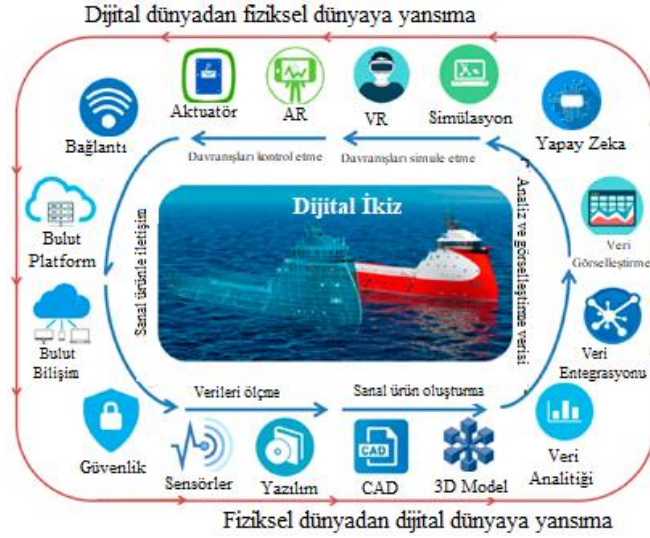
ikiz modeli, mevcut fiziksel modellerin geçmiş ve gerçek zamanlı verilerinin kullanılarak ikizinin ömrünü yansıtabilecek entegre, çok katmanlı, olasılıksal ve ultra gerçekçi simülasyon sistemi veya ürünler olduğunu kabul etmektedir [11]. Rosen vd. [12] dijital ikizin, otonom sistem davranışları ile fiziksel dünyadaki çevre arasında etkileşebilen bir model olduğunu söylemektedirler. Bununla birlikte, o zamanlar dijital ikiz kavramı teknoloji sınırlamaları nedeniyle yeterince olgun değildi. IoT, bulut bilişim, simülasyon teknolojisi ve diğer birçok teknolojinin gelişmesi ile birlikte, dijital ikiz kavramı olgunlaştı ve son zamanlarda dünya çapında büyük ilgi görmeye başladı [13]. Algılama, modelleme ve hesaplama gibi bilgi teknolojilerini kapsamlı bir şekilde kullanan dijital ikiz sanal ortamda, dijital formdaki fiziksel alanla tutarlı, yüksek kaliteli bir model oluşturur. Fiziksel alandaki bilgi, gerçek zamanlı geri bildirim ve veri bütünleşmesi sayesinde nesnelerin davranışlarını simüle edebilir, fiziksel alanı izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kararlar alarak fiziksel alan ve sanal alan arasındaki etkileşimi gerçekleştirebilir [14]. Dijital ikiz, sanal ortam ile fiziksel ortam arasındaki gerçek zamanlı etkileşim, yinelemeli operasyon, optimizasyon ve tam personel/süreç/iş verisi odaklı özelliklere sahip olduğundan, ürün geliştirme, tasarım, işletme, bakım, servis ve üretimin tüm yaşam döngüsü sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İmalat endüstrisi için dijital dönüşümü destekleyen anahtar etkinleştirme teknolojisi haline gelmiştir ve aynı zamanda endüstriyel internet uygulamasının da temelini oluşturmaktadır [15]. Dijital ikiz, bilgisayar destekli simülasyonlara dayanan tüm üretim döngüsündeki aşamaların yanı sıra üretim sistemlerinin sanal olarak devreye alınması, karar destek sistemleri davranış tahminleri ve tüm ürün yaşam döngüsü boyunca bilgi devamlılığını sağlamaya yardımcı olabilir [12, 16, 17, 18]. Bir ürünün genel dijital ikiz modeli, Şekil 1’de gösterildiği gibi fiziksel alandaki fiziksel varlıklar, sanal alanda sanal modeller ve fiziksel ve sanal dünyaları birbirine bağlayan bağlı veriler olmak üzere üç bölümden oluşur.



Şekil 1. Bir ürün için genel dijital ikiz modu [9]

Şekil 1’deki fiziksel dünya, kullanıcılar tarafından çalıştırılabilen gerçek ürünler olup üretim, kullanım, bakım, onarım, revizyon ve diğer işlemler sırasında farklı özellikte davranışlara ve performansa sahip birçok veri üretmektedir. Sanal dünya ise fiziksel ürünlerin sanal alandaki ayna görüntüleri ve eşlemesidir. Tüm yaşam döngüsü sürecini yansıtabilmesinin yanı sıra karşılık gelen fiziksel dünyanın durumunu ve davranışlarını simüle edebilir, izleyebilir, teşhis edebilir, tahmin edebilir ve kontrol edebilir. Sanal modeller sadece geometrik modelleri değil, aynı zamanda malzeme özellikleri, mekanik analiz, sağlık izleme gibi tüm kural ve davranışları da içerir. Bağlı veriler, fiziksel verilerin ve sanal verilerin entegrasyonu, füzyonu ve analizi sonrasında elde edilen bazı yeni verileri içerir. Tasarım ve üretim sürecinde, sanal modellerin parametreleri üretim hattına aktarılır ve sanal modeller gerçek fiziksel ürünlere dönüştürülür [6, 9]. Veri, dijital ikizin temelidir. Dijital ikiz için toplam eleman verilerini toplamak için sensörler, göstergeler, RFID etiketleri, okuyucular, kameralar, tarayıcılar vb. seçilmeli ve entegre edilmelidir. Veriler daha sonra gerçek zamanlı veya gerçek zamanlıya yakın bir şekilde iletilmelidir [19].

Mevcut bir fiziksel ürünün, tam fonksiyonel bir dijital ikizinin oluşturulması için Şekil 2’de gösterildiği gibi altı aşama (sanal ürünle iletişim, verileri ölçme, sanal ürün oluşturma, analiz ve görselleştirme, davranışları simüle etme, davranışları kontrol etme) gerçekleşir ve çeşitli teknolojik araçlar kullanılır.



Şekil 2. Dijital ikizin etkinleştirme teknolojisi [9]

Bu aşamalarla oluşturulan dijital ikiz ayrıca fiziksel ürün ve sanal ürünün birbirleriyle gerçek zamanlı iletişim kurmasını ve zaman içinde birbirleriyle iş birliği yapmasını sağlar [9]. Dijital ikiz, bir ürün veya yapının farklı dijital modellerin bir bileşimi olup daha yüksek fayda ve güvenilirlik sağlamaktadır.

2.2. Dijital İkiz Uygulamaları (Digital Twin Applications)

Dijital ikiz uygulamaları akıllı şehir, inşaat, sağlık, tarım, kargo taşımacılığı, sondaj platformu, otomobil, havacılık, üretim, elektrik vb. alanlarda bulunabilir. Nispeten yeni bir teknoloji olarak, dijital ikizin uygulanmasına önde gelen şirketler (örneğin, GE, PTC, Siemens, ANSYS, Dassault, vb.) öncülük etmiştir [20]. Dijital ikiz teknolojisinin, endüstride mevcut birincil uygulamaları kısaca aşağıdaki şekilde özetlenmiştir.

Başlangıçta, hava sahası alanından gelen konsept, ABD Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı tarafından hava taşıtında daha doğru bir yorgunluk tahmini oluşturmak için kullanılmıştır. Ayrıca, uçak yapısındaki hasar ve kusurları tespit etmek ve izlemek için uçak kanat modelini oluşturmak için de uygulanmıştır. Sonuçların geleneksel yöntemlerden daha yüksek verimlilik ve doğruluk gösterdiği onaylanmıştır [21]. Tüm dünyada ve Türkiye’de elektrifikasyon, otomasyon ve dijitalizasyon konularında çalışmalar yürüten ve dijital dönüşümün rehberi olmayı hedefleyen Siemens’in geliştirdiği dijital fabrika ile fabrika kurulmadan önce, tüm bileşenlerinin bilgisayar ortamında uygun yazılımlarla tasarlanarak fabrikanın çalıştırılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi sağlanmaktadır. Böylelikle, fabrikanın kendisi ortada yokken fabrikanın nasıl çalıştığı öğrenilmekte ve en iyi çalışma sisteminin kurulması için gerekli önlemler alınabilmektedir [22]. Dassault, “Dijital İkiz Singapur” oluşturmak için 3B deneyim platformunu kullanmıştır. Sağlık alanında Sim&Cure, anevrizmaların tedavisi için hasta bazlı dijital ikiz geliştirmiştir. Tesla, otomobil ve tesis arasında eşzamanlı veri aktarımını sağlamak için her elektrikli otomobil için bir dijital ikiz geliştirmeye çalışmıştır [23]. General Electric ise uçakların yanısıra, ürün yaşam döngüsünde ürün sağlığını tahmin etmek için dijital ikiz teknolojisini kullanmış ve sonuç olarak operasyonları ve bakımları daha verimli hale getirmiştir [13]. Havacılık endüstrisinde, Airbus, Boeing, AFRL ve NASA, gerçek koşulları yansıtmak, kusurları belirlemek, olası hataları tahmin etmek ve uçak gövdesi bakım sorununu çözmek için dijital ikizi kullanmışlardır [24].

Gockel vd. [25] uçuş zamanını değerlendirmede dijital ikizi kullanarak gerçek zamanlı olarak hasar tespiti önerisinde bulunmuşlardır. Seshadri ve Krishnamurthy [26] uçak yapısal sağlık yönetimi için dijital ikize dayanan bir hasar karakterizasyonu yöntemini önermişlerdir. Bu durum, hasar yeri, büyüklüğü ve yönelimini tahmin etmede büyük ilerlemeler göstermiştir. Um vd. [27] modüler, çok satıcılı montaj hatlarında tak ve çalıştır özelliğini desteklemek için dijital ikizi temel alan evrensel bir veri modeli önermişlerdir. Zhang vd. [28] içi boş camın otomatik üretim hattı için dijital ikiz odaklı hızlı bir özelleştirme tasarımı ve optimizasyon yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Magargle vd. [29] bir fren sistemi modelinde

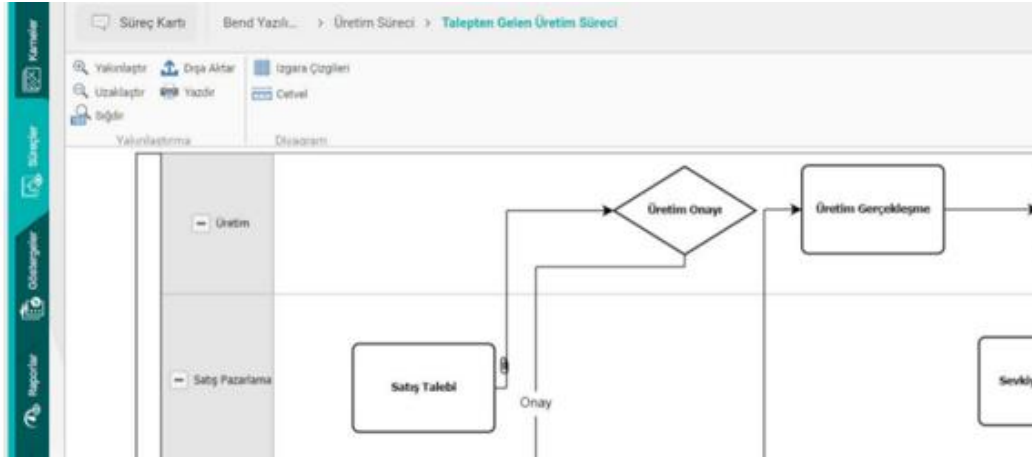
simülasyon tabanlı bir dijital ikiz modelin oluşturulmasını önermişlerdir. Vathoopan vd. [30] bir otomasyon modülünün dijital ikizini kullanan yeni bir modüler düzeltici bakım metodolojisini önermişlerdir. Coronado vd. [31] titanyum parçaların üretim çalışmasını izlemek için üretim yürütme sistemini kullanan bir vaka çalışmasıyla üretim kontrolü ve optimizasyonu için kullanılabilen bir atölye dijital modelini gerçekleştirmişlerdir. Cunbo vd. [32] karmaşık bir ürün montaj süreci için dijital ikiz tabanlı bir akıllı yönetim ve kontrol yöntemi önermişlerdir. Liau vd. [33] fiziksel süreçlerin iki yönlü kontrolünü sağlamak için enjeksiyonlu kalıplamanın tüm aşamalarını sanal modelleyerek, enjeksiyonlu kalıplama endüstrisine dijital bir ikiz uygulamışlardır. Botkina vd. [34] süreç planlaması için optimize edilmiş işleme çözümlerini geliştirmek için dijital ikiz modelini uygulamışlardır. Guivarch vd. [35] mekanik bileşenlerin hizmet ömrünü daha iyi tahmin etmek için helikopter güç sistemleri için bir dijital ikiz geliştirmişlerdir. Guo vd. [36] fabrika tasarımında kullanılmak üzere esnek dijital ikiz oluşturmaya ve buna uygun değişiklikleri gerçekleştirmeye yardımcı olmak için modüler bir yaklaşım önermişlerdir. Mukherjee ve DebRoy [37] 3B baskı makinesinin dijital ikizinin oluşturulması çalışmasını yapmışlardır. Chakshu vd. [38] birleştirilmiş kan akışı ve kafa titreşim modeli yardımıyla bir insan yüzünün videosundan karotis darlığının ciddiyetini tespit etmek için dijital ikiz tabanlı bir metodoloji önermişlerdir. Shim vd. [39] daha güvenilir karar verme için dijital ikiz model konseptini kullanarak yeni nesil bir köprü bakım sistemi önermişlerdir. Ghosh vd. [40] endüstri 4.0 üretim sistemleri için gizli Markov modellerini kullanarak dijital ikizlerin oluşturulmasını önermişlerdir. Önerilen dijital ikiz modeli taşlama işlemlerinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün dijital ikizinin oluşturulmasına uygulanmıştır. Coraddu vd. [41] gemideki sensörlerden toplanan büyük miktarda bilgidir yararlanarak, geminin veri güdümlü bir dijital ikizini oluşturmuşlar ve deniz kirliliğinden kaynaklanan hız kaybını tahmin etmek için kullanmışlardır. Bao vd. [42] üretim proseslerinde dijital ikiz için bir modelleme ve operasyon yaklaşımı önermişlerdir. Luo vd. [43] CNC takım tezgahının güvenilir kestirimci bakımını gerçekleştirmek için dijital ikiz tarafından yönlendirilen hibrit bir yaklaşım önermişlerdir. Liu vd. [19] yaptıkları çalışmada, atölyelerin hızlı ve verimli bir şekilde süreç planları oluşturması için akıllı bir zamanlama yöntemi geliştirmede dijital ikiz ve süper ağıın avantajlarını bütünleştirmişlerdir. Qian vd. [44] dijital ikiz oluşturma sürecinde veri modelleme ve dijital modelin doğrulanma sorununu çözmek için çok boyutlu veri modelleme ve model doğrulama yöntemlerini önermişlerdir. Suljagic ve Çelebi [45] yaptıkları çalışmada, düşük maliyetli bir robot kolunun dijital ikizini elde ettikten sonra gerçek zamanlı verilerle bir simülasyon uygulaması yapmışlardır. White vd. [46] akıllı şehir uygulamasında kullanılmak üzere İrlanda'daki Docklands bölgesinde bir dijital ikiz çalışması yapmışlardır. Burgos ve Ivanom [47] Covid-19 pandemisinin gıda perakende tedarik zincirleri ve dayanıklılıkları üzerindeki etkisini tespit edebilmek için gerçek hayattaki pandemi senaryolarına dayanarak, anyLogistix dijital tedarik zincirleri ikizinin yardımıyla tedarik zincirleri operasyonlarını ve performans dinamiklerini ayrıık olay simülasyon modeli geliştirerek incelemişlerdir. Yi vd. [48] akıllı montaj süreci tasarımı için dijital bir ikiz referans modeli sunmuşlar ve üç katmanlı DT tabanlı akıllı montaj için bir uygulama çerçevesi önermişlerdir. Wang vd. [15] yaptıkları çalışmada, izole edilmiş makineleri birbirine bağlı bir sisteme bağlamak ve makine koşullarını gerçek zamanlı olarak izlemek için bir dijital ikiz çerçevesi önermişlerdir. Priyanka vd. [49] petrol boru hattı sisteminin risk olasılık oranını analiz etmek ve tahmin etmek için makine öğrenimi ve prognostik algoritmalar modeline dayalı dijital ikiz çerçeve yapısını sağlamayı amaçlamışlardır. Choi vd. [50] derin öğrenme ve dijital ikizi kullanan güvenlik bilincine sahip insan-robot iş birliği için yeni entegre bir karma gerçekliğe sahip bir sistem önermişlerdir. Bu çalışma, robotun dijital ikizi ve insan iskeletine dayalı basit ama etkili bir 3B uzaklık tabanlı güvenlik mesafesi hesaplama yöntemi önermektedir. Lari vd. [51] yapılan ölçümler ile belirli bölgelerin derinliğini simüle etmek için doğal kaynak bölgesi tükenmesi süreçlerinin ve gelecekteki eğilimlerin genel bir dijital ikizini oluşturma önerisinde bulunmuşlardır. Gao vd. [52] belirsiz liman sevkiyatı için dijital ikiz ile etkinleştirilmiş otomatik bir depolama sahası çizelgeleme çerçevesi önermişlerdir. Otomatikleştirilmiş depolama alanı çizelgelemesindeki dijital ikiz uygulamaların operatörlerin optimizasyon kararları almasına yardımcı olduğunu göstermiştir. Granacher vd. [53] karar vericilerin ihtiyaçlarını ve tercihlerini etkileşimli olarak optimizasyon tabanlı bir modele dönüştüren ve anlamlı çözümler üreten bir süreç ve enerji sistemi tasarımının dijital ikizini önermişlerdir. Yang vd. [54] bir iletim sisteminin performans düşüşünü tahmin etmek için dijital ikiz teknolojisi tarafından yönlendirilen bir hibrit yaklaşım çerçevesi sunmuşlardır. Fang vd. [55] deniz yapılarının çatlak büyüme eğilimini doğru bir şekilde tahmin etmek için dijital ikize dayalı açık deniz platformlarında yorulma çatlağı büyüme tahmin yöntemini önermişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Yapılan çalışmada, hazır giyim perakende sektöründe öncü olan bir firmanın veri dijitalleştirme projesi kapsamında, fiziksel ortamın sanal kopyasının oluşturulması ile üretimi her yönden analiz etmeye yardımcı olacak dijital ikiz çalışmalarının altyapısının oluşturulması amaçlanmıştır. Firmadaki veri dijitalleştirme projesi kapsamında yapılacak olan; mevcut ve olması istenen sistem süreç haritalarının oluşturulması, tüm verilerin arayüzler ile veritabanında tutulmasının sağlanması ve olması istenen fiziksel ve sanal sistemin kurulması çalışmaları üç fazdan oluşmaktadır. Bu fazların kapsamı aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.1. Birinci Faz Çalışması (First Phase Study)

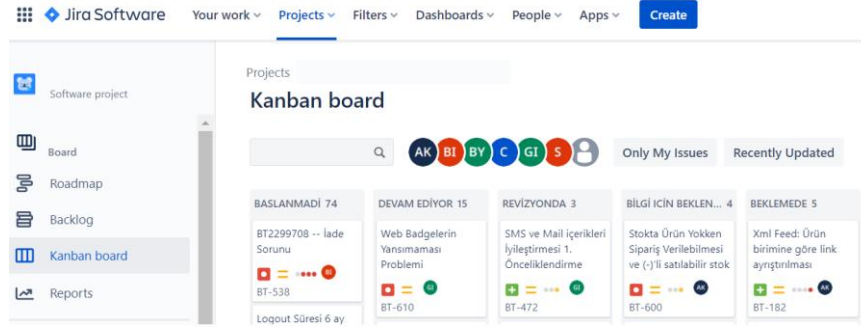
Üretim sahasında bulunan; ham madde depolama ve sevk, üretim hattı giriş ve çıkış, yarı mamul kabul, adresleme ve sevk süreçleri için mevcut ve olması gereken süreç haritaları işlemleri, süreç yönetim sistemi olan ve kurumların fonksiyonel odaklı yönetim anlayışından süreç odaklı yönetim anlayışına geçiş için mevcut süreçlerin modellenmesi, görsel olarak dokümanite edilmesi, süreç performans göstergelerinin belirlenmesi ve yönetilmesi gibi işlevler ile gerekli altyapıyı sağlayan ve Şekil 3'te bir bölümü gösterilen ensemble platformu üzerinde oluşturulmuştur. Ayrıca, ensemble platformuna tüm birimlerdeki çalışan bilgileri, görev tanımları ve talimatlar eklenerek tüm çalışanlar tarafından görüntülenebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. Ensemble platformu süreç yönetim ekranı

3.2. İkinci Faz Çalışması (Second Phase Study)

Süreçlerde kullanılan form, program, talimat ve kullanıcılar incelenerek süreçlerdeki verinin veritabanında tutulabilmesi için bir kurumsal kaynak planlama (ERP) sistemi oluşturulmuştur. Yazılım projelerinde, bütçe ve zaman kısıtına uygun olarak müşteri gereksinimlerinin karşılanabilmesi için proje yönetimi büyük önem taşımaktadır. Yazılım projesinin kalitesini etkileyen en önemli unsurlardan birisi kullanılan proje yönetimi metodolojisidir. Çevik (agile) proje yönetimi, yazılım projelerinin geliştirilmesi için kullanılabilir yinelenmeli ve artırılmalı proje yönetim biçimidir. Piyasaya çok çabuk ürün çıkarabilmeyi, değişen isteklere hızlıca yanıt verebilmeyi ve en kısa sürede bir yazılım ürününü müşteri hizmetine sunabilmeyi amaçlaması açısından çevik metotlar avantajlı bulunmaktadır. Bu yüzden, bu çalışmada ERP sistemi oluşturulurken, proje yönetimi metodolojilerinden çevik metodu kullanılmıştır. Ayrıca, iş takibi, proje yönetimi, hata takibi, iş akış yönetimi ve raporlama gibi birçok işlemin online platform aracılığıyla yapılmasını ve tüm ekip tarafından görüntülenebilmesini sağlayan Jira proje takip platformu da çevik metodu ile birlikte kullanılmıştır. Buna bağlı olarak, projelerin girişi, proje ekibinin oluşturulması ve proje takibi Şekil 4'te gösterilen jira platformu aracılığıyla yapılmıştır. Böylelikle, ihtiyaçlara ve kurumsal yapılanmaya göre düzenlenebilen bir sistem oluşturulmuştur.



Şekil 4. Jira platformu proje yönetim ekranı

Bu fazda; sahada el terminali, tablet ve televizyon kullanılırken ofiste bilgisayar ve yazıcılar kullanılmıştır. ERP sisteminin oluşturulması süreçler bazında gerçekleştirilmiş olup Systems Analysis and Program Development Graphical User Interface (SAP GUI), Systems Analysis and Program Development FIORI, web ve android uygulamalar kullanılmıştır. Raporlama ve dashboard araçları olarak Business Warehouse (BW), Power Business Intelligence (Power BI) ve Systems Analysis and Program Development Objects Business Intelligence (SAP BI) kullanılmıştır.

3.3. ÜÇÜNCÜ FAZ ÇALIŞMASI (THIRD PHASE STUDY)

Fiziksel ortamdaki tüm verilerin sanal ortama aktarılması sağlanarak istenilen parametreler ve algoritmalar ile süre tahminleme, duruş takibi ve üretim çizelgeleme gibi çalışmalar ile haberleşebilen ve kendi kendine karar verebilen bir sistem inşası için altyapı çalışması yapılmıştır. Makinelere sensörler vasıtasıyla ve çalışanlardan arayüzler ile alınan veriler ERP sisteminde depolanarak büyük bir veri elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen büyük veri ile farklı özelliklere sahip bir ürünün üretiminin ne kadar sürede tamamlanabileceği sonucuna ulaşmak için tahminleme çalışması yapılmıştır. Tahminleme çalışmasında; verinin işlenmesi, yorumlanması, görselleştirilmesi ve raporlanmasını sağlayan bir veri analiz platformu kullanılmıştır. Knime platformunda bulunan ve sayısal tahminlemede kullanılabilen lineer regresyon, polinomal regresyon, rassal orman regresyon algoritması ve gradyan destekli karar ormanı regresyonu olmak üzere dört algoritma seçilmiştir. Bu algoritmalarla model kurularak veri seti için üretim süresi tahminlemesi yapılmıştır.

4. BULGULAR (FINDINGS)

4.1. Birinci Faz Çalışmasından Elde Edilen Bulgular (Findings from the First Phase Study)

4.1.1. Ham Madde Depolama ve Sevk Süreçleri (Raw Material Storage and Shipping Processes)

Bu aşamada, ham maddelerin, üretilecek ürünlere göre satın alma işlemi tamamlandıktan sonra depolama alanına alışı, kalite kontrol, adresleme, stoklama ve üretim yapılacak sahalara sevk işlemleri yapılmaktadır. Bu aşamada mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 1’de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 1. Ham madde depolama ve sevk süreçlerinin incelenmesi

| Mevcut Süreç | Olması İstenen Süreç |
|--|--|
| Ham maddeler termin tarihi referans alınarak satın alınır. | Ham maddelerinin termin tarihi referans alınarak satın alınması. |
| Ham madde kabul için manuel olarak kapasite yönetimi yapılarak tedarikçilere mail üzerinden randevu verilmektedir. | Ham madde kabulde kapasite yönetiminin ve randevu sürecinin sistemselsel olarak yapılması. |
| Verilen randevu tarih ve saatinde fiziksel ve sistemselsel alış işlemi gerçekleştirilir. | Tedarikçi tarafından alınan randevu tarih ve saatinde fiziksel ve sistemselsel alış işleminin alt ve üst tolerans değerleri arasında gerçekleştirilmesi. |

| | |
|---|--|
| | Tolerans değerlerinin sistem tarafından satın alma siparişi miktarına göre kontrol edilmesi ve toleransı aşan durumlar için yönetici onayına düşmesi. |
| Kalite kontrol işlemi yapılarak kontrol formu doldurulup ilgili kişilere iletilir. | 4 puan kalite kontrol sistemi kullanılarak sonuçların kontrol esnasında sisteme saha görevlisi tarafından girilmesi. Girilen kalite kontrol sonuçlarına göre onay alınması gereken ham maddelerin ilgili kişinin sistem üzerinden onayına düşmesi ve tüm sonuçlar ile onaylarının veritabanında tutulması. |
| Sonuç onayı gerekiyor ise adresleme için ilgili kişi onayı beklenir. | Barkod adresleme sistemi ile kalite kontrolsüz de olsa adresleme yapılabilmesi. |
| Kalite kontrolden geçen veya onay alan ham maddeler raflara konularak manuel adreslenir. | Kalite kontrol işlemi tamamlanmayan ham maddenin üretime sevk edilememesi. |
| Üretime çıkış için ilgili kişiler tarafından hazırlama emri verilir. | Üretime çıkış için ilgili üretici ve miktar seçimi ile sistem üzerinden hazıredim yapılması. Hazıredimin ilgili birime sistemsel çıkış işlemi ile sevk edilmesi. |
| Çıkış işlemi için adresteki ham madde bulunarak ilgili birime sevk irsaliyesi ile teslim edilir | Sevk irsaliyesinin sistem tarafından yazdırılması. |

4.1.2. Üretim Hattı Giriş ve Çıkış Süreçleri (Production Line Entry and Exit Processes)

Bu aşamada ise ham maddeler, üretim hattı doluluğu ve üretim terminlerine göre üretim alanlarına gönderilip ön işlemlerden geçmesi sağlanır. Ön işlemler tamamlanıp gerekli onaylar alındıktan sonra ham madde üretim proseslerinde, üretim özelliklerine göre işlenir ve yarı mamul olarak torbalanır. Bu aşamada da mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 2’de verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 2. Üretim hattı giriş ve çıkış süreçlerinin incelenmesi

| Mevcut Süreç | Olmaması İstenen Süreç |
|---|--|
| İlgili çıkışa istinaden ham madde kabul edilir. | Ham madde kabulünün barkod okutma yapılarak üretim stoğuna alınması. |
| Çıkış irsaliyesine göre iş talimatı çıktısı alınır. | Barkod okutma ile ham maddeye ait tüm sipariş bilgilerinin sistemde görüntülenebilmesi. |
| Ham maddede ölçüm yapılarak sonuçlar iş talimatına el ile yazılır. | Ham maddeye ait tüm ölçümlerin saha görevlisi tarafından sistemsel giriş yapılması. |
| Ölçümlere göre kalıp çizimleri yapılır ve veriler iş talimatına el ile yazılır. | Giriş yapılan ölçülere göre kalıp çizimlerinin yapılarak ilgili bilgilerin sistemsel giriş yapılması. |
| Yapılan ölçümlere göre müşteriye excel formu ile onay alınır. | Giriş yapılan bilgilere göre müşteriye otomatik mail düşmesi ve sistemsel onayın verilmesi. |
| Onay işleminden sonra ham madde üretim hattına girerek 3 farklı prosesten geçer. | Verilen onayın üretim birimine otomatik mail ile iletilmesi. Onay gelen kayıtları saha personelinin görerek yapılan işlemleri kayıt yapabileceği bir sistemin kurulması. |
| Proseslerde yapılan işlemler manuel olarak iş talimatı ve ilgili defterlere kayıt edilir. | Üretim çizelgelemesinin sistem tarafından yapılmasının sağlanması. Ekipman bakım, onarım ve duruş takibinin yapılabilmesi. |
| Yarı mamul operasyonlara göre torbalanarak sevk birimine teslim edilir. | Üretilecek ürün detayının saha personeli tarafından görülebilmesinin sağlanması. |
| Yarı mamul üretim hattından çıktıktan sonra gerçekleşen bilgiler müşteriye mail ile iletilir. | Gerçekleşen veriler ile planlanan verilerin haberleşmesi sağlanarak bir karar destek sistemi kurulması ve hat dengelemenin belirlenen kriterlere göre sistem tarafından otomatik olarak yapılmasının sağlanması. |

4.1.3. Yarı Mamul Kabul ve Sevk Süreçleri (Semi-Finished Product Acceptance and Dispatch Processes)

Burada, yarı mamul, üretim termin süresine göre adreslenerek stoklanır ve termini yaklaşanlar için randevu sistemi ile sevk planlanır. Bu aşamada mevcut süreçler incelenmiş ve olması istenen süreçler Tablo 3’te verildiği gibi belirlenmiştir.

Tablo 3. Yarı mamul kabul ve sevk süreçlerinin incelenmesi

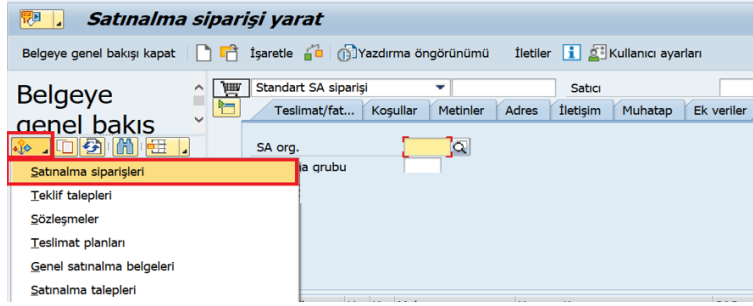
| Mevcut Süreç | Olması İstenen Süreç |
|--|---|
| Üretim hattından çıkan yarı mamuller Excel formu doldurularak teslim alınır. | Üretim hattından çıkan yarı mamullerin sistemsel olarak kabul edilmesinin sağlanması. |
| Yarı mamuller operasyon bazında sepetlere konur ve ürün bilgilerinin bulunduğu excel formları sepetlere yapıştırılır. Sepetler saha personeli tarafından raflara yerleştirilir ve stok formu doldurulur. | Yarı mamullerin sepetlere ve raflara sistemsel olarak adreslenmesinin sağlanması. |
| Stok girişi yapacak personele form iletilerek excele giriş yapılması sağlanır. | Tüm form ve excellerin sistem üzerine aktarılması ve sistemsel raporlama yapılmasının sağlanması. |
| Sevk olacak yarı mamul için ilgili kişi mail üzerinden randevu talep formu ile randevu talebini iletir. | Stokların anlık olarak görülmesi ve system üzerinden randevu talebinin oluşturulmasının sağlanması. |
| Randevu bilgisine göre hazırlanacak ürünler listenelenip saha personeline iletilir. | Saha personelinin raf adreslerindeki ürünleri görerek işlem yapmasının sağlanması. |
| Personel sahayı gezerek ürünleri bulur ve sepetleri sevk alanına çeker. | |
| Ürünlerin irsaliyesi kesilerek ilgili randevu için araca yüklemesi gerçekleştirilir. | |
| Sevk olan yarı mamul bilgileri sevk kağıdına yazılarak stok listesinden çıkış yapacak personele iletilir. | İlgili randevu talebine göre sevk işleminin yapılarak stoktan düşme sağlanması. |
| Sevk olan yarı mamuller stok Excelinden çıkarılarak stokun güncellenmesi sağlanır. | |
| Belirli periyotlar ile randevu talep edecek birime stok raporu hazırlanarak mail üzerinden iletilir. | |

4.2. İkinci Faz Çalışması (Second Phase Study)

Mevcut ve olması istenen süreç haritaları oluşturulduktan sonra bu fazda tüm süreçlerin ERP'ye aktarım çalışmaları yapılmıştır.

4.2.1. Ham Madde Depolama ve Sevk Süreçleri ERP Aktarımı (Raw Material Storage and Dispatch Processes ERP Transfer)

Ham madde satın alma siparişlerinin oluşturulabilmesi için sisteme ham madde tanımları ve tedarikçi firma bilgileri eklenmiştir. SAP satın alma siparişi oluşturma ekranı ham madde ve tedarikçi seçimi seçenekleri eklenerek, satın alınacak miktar ve ödenecek ücret bilgilerinin girilmesi ile oluşturulmuştur. Tüm kayıtlar kullanıcı bazında tutularak onay süreçleri kullanıcı bilgisi üzerinden ilerlemiştir. Tedarikçi ile entegrasyon çalışması yapılarak sipariş ve fiyat bilgilerinin iletilmesi sağlanmıştır. Tedarikçi tarafından randevu alınabilecek randevu sistemi geliştirilmiş olup depolama kapasitesi her birim için sipariş yoğunluğuna göre değişkenlik gösterebilecek şekilde tasarlanmıştır. Tedarikçiden gelen ürünler lojistik birimine teslim edildiğinde entegrasyon ile sipariş detay bilgileri alınmış ve fiili olarak az ya da fazla gelme durumları için onay süreci işletilmiştir. Onay süreci için sisteme tolerans değerleri verilmiş olup gelen sipariş bilgilerinin aralığa uymaması durumunda satın alma siparişini oluşturan ilgili kişinin onayına sistemsel olarak düşmekte ve onay işleminden sonra ham madde kabul gerçekleştirilebilmektedir. Yapılan satın alma siparişi oluşturma ve onay ekranı Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Satın alma siparişi oluşturma ve onay ekranı

Ham madde satın alındıktan sonra tedarikçi firma tarafından depolama alanına getirilir ve depo girişi yapılır. Depo girişinden sonra satın alma siparişinin durumu kalite kontrolle girecek olarak güncellenir ve el terminali ile ham madde üzerindeki barkod okutma işlemi yapılarak raf alanına yönlendirilir. Ham madde hata kontrolü Şekil 6’da verilen ışıklı kalite kontrol makinelerinde yapılmaktadır.



Şekil 6. Kalite kontrol makinesi

Kalite kontrol işlemi proses doluluğuna göre örneklem seçimi yapılarak yürütülmektedir. Yapılan kontrol sonrası elde edilen değerlere göre Tablo 4’te gösterilen hata puanları verilir.

Tablo 4. Kalite kontrol sistemi hata puanları

| Kumaş hata uzunluğu | Hata puanı |
|---|------------|
| 0-3 inç arası | 1 |
| 3-6 inç arası | 2 |
| 6-9 inç arası | 3 |
| 9 inç yukarısı | 4 |
| Delik ve açıklık 1 inç ya da daha düşük | 2 |
| Delik ve açıklık 1 inç üzeri | 4 |

Sonrasında, 4 puanlık kalite kontrol sistemi için arayüz ile saha personelinin işlem bilgilerinin girişini yapacağı Şekil 7’de gösterilen bir uygulama geliştirilmiştir. Kalite kontrol makinesindeki sensörler ile tabletteki uygulamanın haberleşmesi sağlanarak ilgili bilgilerin alınması sağlanmıştır. 4 puanlık sisteme göre kalite kontrolden geçen satın alma siparişinin durumu puan bilgisine göre “uygun”, “kusurlu” veya “uygunsuz” olarak güncellenmektedir. Kalite kontrol işlemi yapılmadan ve durumu uygunsuz olarak görünen ham maddeler için çıkış işlemine sistem tarafından izin verilmemektedir.

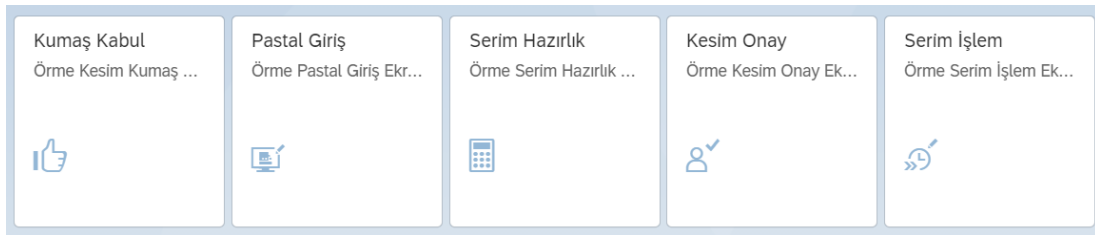


Şekil 7. Kalite kontrol yazılım uygulaması

Çıkış işlemi için ilgili kişi tarafından ham maddeler siparişe bağlanır ve ilgili üretim yeri için sistemsel çıkış talebinde bulunur. Yapılan talep lojistik birimi tarafından toplu olarak rezervasyon ekranından takip edilir. Çıkış işlemi yapılacak ham maddeler el terminali ile toplanarak sistemden barkotlu sevk irsaliyeleri alınır ve ilgili birime teslim edilir. Sistem ile ham madde kabul süresi, adresleme süresi, kapasite doluluk oranı, kalite kontrol oranı, sevk süresi ve hazırlama süresi gibi bilgiler raporlama araçlarıyla raporlanabilmektedir.

4.2.2 Üretim Hattı Giriş ve Çıkış Süreçleri ERP Aktarımı (Production Line Entry and Exit Processes ERP Transfer)

Çıkış işlemi yapılan sevk irsaliyesindeki barkod okutulmuş üretim birimine sistemsel giriş yapılır ve ham madde için yapılan ölçüm bilgileri saha personeli tarafından sisteme girilir. Burada, herhangi bir kâğıt çıktı alınmasına gerek olmadan tüm işlemler sahadaki tablet, bilgisayar ve televizyon üzerinden takip edilebilmektedir. Yapılan bu faaliyetlerin proses bazlı işlem ekranları Şekil 8’de gösterilmektedir.



Şekil 8. Proses bazlı işlem ekranları

Bu aşamada, ölçüm bilgileri girilen ham maddeler ilgili kişilere sistemsel olarak onaya gönderilir ve onay gelmeden sistemsel olarak işleme alınması mümkün olmamaktadır. Onay gelen siparişler onay ekranına düşmekte ve durumu onaylandı olarak görülmektedir. Durumu onaylı olan siparişler onay tarihine ve termin bilgisine göre sistem tarafından sıralanarak üretim hattı girişindeki birinci ekrana yansır. Sonrasında, hat doluluk ve çalışan bilgisine göre sistem tarafından üretim çizelgeleme yapılır ve hatta çalışan kişilerin önüne üretim yapılacak siparişler Şekil 9’da gösterilen üretime alınacak sipariş bilgilendirme ekranına düşer. Her bir üretim hattındaki görevli personel tarafından tablet ile ilgili sipariş için *üretim başladı* olarak durumu güncellenir. Tablet ekranında personelin ihtiyacı olan tüm bilgiler görüntülenebilmektedir. Siparişin durumu “*üretim başladı*” olarak güncellendiğinde sipariş bilgilendirme ekranından kaybolmakta ve üretim çizelgeleme ekranı da güncellenmektedir.

| SerimID | PastalID- gerber | Parti | Satıcı Partisi | Pastal Beden Sayısı | En | Malzeme Kodu | Malzeme Tanım | Model Adı | MS Mik. | YMM |
|---------|---------------------|------------|----------------|---------------------|----|--------------|--|------------------------|---------|------|
| 12290 | 165-23107-MTRJ-175A | 21Y3489869 | 17769-1-1-3 | Pastal Beden Sayısı | En | 1030123655 | 30/1 Penye LQJ BLA SUP EMPRM | GPJ,COOKING-B 21K 3010 | 3.408 | 3.40 |
| 12288 | 115-34942-SYH-187 | 21Y3237668 | 2988 | Pastal Beden Sayısı | En | 1030063171 | 30/1 PNY PAM LYC SUP DÜZ CVL LCW YENİ Sİ | TYT,KUŞAK-ALT 21Y 3010 | 11.340 | 11.3 |

Şekil 9. Üretime alınacak sipariş bilgilendirme ekranı

Birinci prosesdeki işlem bittiğinde siparişin durumu “*üretim bitti*” olarak güncellenir ve gerçekleşen verinin makineden alınması sağlanır. İşlemler tüm prosesler için aynı şekilde girilir. Gerçekleşen verilerin makineler üzerinden alınarak ilgili siparişe aktarılması ve listelenmesi Şekil 10’da verilen üretim bilgi görüntüleme ekranında gösterilmektedir.

| Status | Serim Başl | Serim Başl | Serim Biti | Serim Biti | Kullanı... | Model Adı | Üretim Sp | Renk | Müşteri sprş... | Mştr.spr... | İplik ... | Kumaş Kalı |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------------|------------|------|-----------------|-------------|-----------|------------|
| SR | 14.06.2021 | 22:25:07 | 14.06.2021 | 23:03:58 | | UK.BDY,DARLY-1W 21K 30... | 1202049671 | FFB | 1010100795 | 100 | 220 | 122 |
| SRMF | 14.06.2021 | 22:25:07 | 14.06.2021 | 22:25:54 | | UK.BDY,DARLY-1W 21K 30... | 1202049671 | FFB | 1010100795 | 100 | 220 | 122 |
| SRMF | 14.06.2021 | 22:25:07 | 14.06.2021 | 22:25:31 | | UK.BDY,DARLY-1W 21K 30... | 1202049671 | FFB | 1010100795 | 100 | 220 | 122 |
| SRMF | 16.06.2021 | 09:14:42 | 16.06.2021 | 09:15:15 | | UK.BDY,DARLY-1W 21K 30... | 1202049671 | FFB | 1010100795 | 100 | 220 | 122 |

Şekil 10. Üretim bilgi görüntüleme ekranı

Sonrasında, proses ve kullanıcı bazlı tüm bilgilerin sistemde tutularak günlük, haftalık ve aylık performansların görüntülenebileceği ekran Şekil 11'deki gibi oluşturularak ilgili birimlere konumlandırılmıştır.

| İşe Gelen Personel Sayısı | | Serim Kg | | | | Toplam Adet | | | Serim Sayısı | | | 14. HAFTA | | Serim Kg | |
|---------------------------|----|-----------|---------|---------|-----|-------------|---------|---------|--------------|-----------|--------|------------------|--------|-----------|--------|
| PAZARTESİ | 80 | 10. HAFTA | 125.000 | 850.000 | 250 | 14. HAFTA | 130.000 | 870.000 | 200 | PAZARTESİ | 25.000 | SALI | 20.000 | PAZARTESİ | 25.000 |
| SALI | 82 | 11. HAFTA | 130.000 | 900.000 | 300 | 12. HAFTA | 135.000 | 910.000 | 350 | SALI | 20.000 | ÇARŞAMBA | 30.000 | ÇARŞAMBA | 28.000 |
| ÇARŞAMBA | 85 | 13. HAFTA | 130.000 | 790.000 | 250 | 14. HAFTA | 130.000 | 870.000 | 200 | PERŞEMBE | 28.000 | CUMA | 24.000 | CUMA | 24.000 |
| PERŞEMBE | 80 | | | | | | | | | CUMARTESİ | | CU M A R T E S İ | | CUMARTESİ | |
| CUMA | 78 | | | | | | | | | PAZAR | | PAZAR | | PAZAR | |
| CUMARTESİ | | | | | | | | | | | | | | | |
| PAZAR | | | | | | | | | | | | | | | |

| Serim Personeli | Gerçekleşen Kg | | | | | Serim | | |
|------------------------------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 10. HAFTA | 11. HAFTA | 12. HAFTA | 13. HAFTA | 14. HAFTA | 10. HAFTA | 11. HAFTA | 12. HAFTA |
| ÖRME KESİM/HANE SEFİ | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| İŞ GELİŞTİRME MÜHENDİSİ | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| OPERASYON DİSTER GÖREVLİSİ | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| ÜRETİM PASTAL UZMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| MAKİNE BAKIM TEKNİSYENİ | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| CUTTİK ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| CUTTİK YARDIMCI ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| KURMAK SAKUL VE KESME SEVK ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| MAKASTAR | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| PASTAL SERİM ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| PASTAL SERİM YARDIMCI ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| TANIM METOLARNA ELEMANI | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |
| HİEMETLİ | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 15.000 | 100 | 100 | 1 |

| Serim Personeli | PAZARTESİ | | | SALI | | | ÇARŞAMBA | | | Kg |
|-----------------|-----------|--------------|--------|-------|--------------|--------|----------|--------------|--------|-------|
| | Kg | Serim Sayısı | Adet | Kg | Serim Sayısı | Adet | Kg | Serim Sayısı | Adet | |
| MUSTAFA BAYAZIT | 2.500 | 15 | 20.000 | 2.500 | 15 | 20.000 | 2.500 | 15 | 20.000 | 2.500 |

Şekil 11. Performans gösterge raporu ekranı

Proseslerde yarı mamul için Şekil 12'deki QR kodlu barkod yazdırması yapılarak üretime ait tüm bilgiler QR kod içerisinde tutulmuştur. Yarı mamuller QR kodları ile paketlenerek sevk birimine teslim edilir. Oluşturulan QR sistemiyle onay süresi, proses bazlı çevrim süresi, kullanıcı bazlı işlem süresi, üretim gün süresi ve makine duruş oranı gibi bilgiler ölçülebilmektedir.



TORBA-202110057900

Şekil 12. Paket takip QR kodları

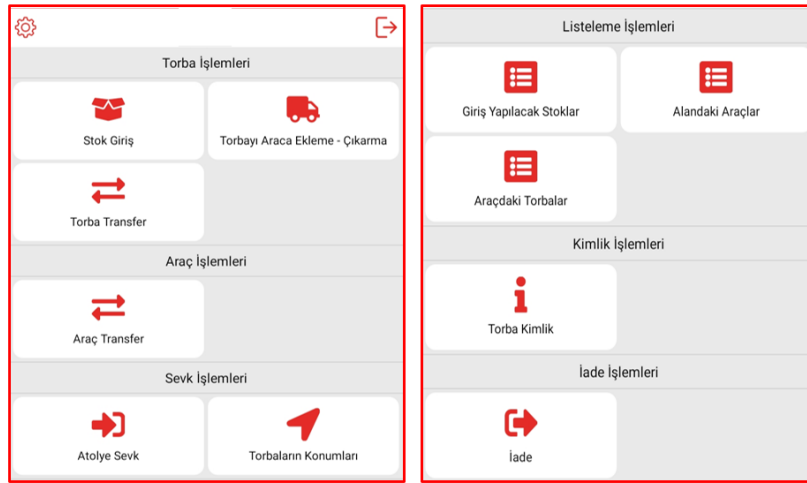
4.2.3. Yarı Mamul Kabul ve Sevk Süreçleri ERP Aktarımı (Semi-Finished Product Acceptance and Dispatch Processes ERP Transfer)

QR kodlar el terminali ile okutularak yarı mamul sevk biriminin stoğuna alınır ve yarı mamuller operasyon bazında sepetlere adreslenir. Sistem yarı mamul için operasyon bilgisini kontrol ederek yalnızca ilgili operasyona ait sepetlere adreslenmesine izin vermektedir. Bir sepete başka bir siparişe ait yarı mamul paketi eklenmek istendiğinde uyarı vererek siparişlere ait paketlerin karışmasını önlemektedir. Sepetler alınarak el terminali ile raflara adreslenir. Her bir operasyon için farklı raf alanları olup operasyon tipine uymayan sepetler ilgili raflara adreslenememektedir. Burada kullanılan araç ve alan QR kodları Şekil 13'te gösterilmektedir.



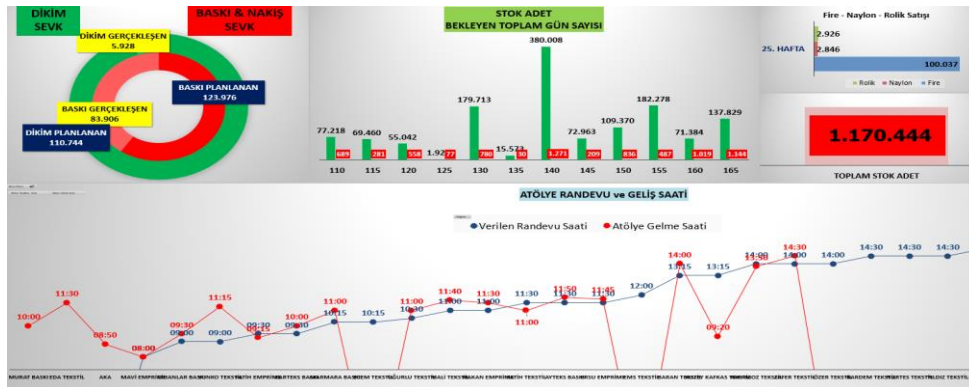
Şekil 13. Sepet ve adres QR kodları

Stokta görünen yarı mamul sevki için ilgili kişi ilgili firma için sistemden randevu talebini yapar. İlgili randevu bilgisine göre saha personeli Şekil 14’teki uygulamadan el terminaline sepetleri okutarak sevk alanına transfer sağlar.



Şekil 14. Saha personeli app uygulaması

Her bir sepet ve paket QR kodu okutması el terminali ile gerçekleştirilerek kontrol listesi oluşturulur ve sevk irsaliyesi kesilir. Sevk ve kontrol listesi bilgileri otomatik mailer ile ilgili kişilere yönlendirilir. Randevu ve sevk alacak araç bilgileri Şekil 15’teki dashboard ile sahadaki personele yansıtılarak işlem kolaylığı ve sevk süresinin minimuma indirilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 15. Sevk süreçleri dashboard ekranı

Tüm işlemler kullanıcı bazlı yapılmakta ve sistem üzerinden takip edilmektedir. Sistem ile kapasite doluluk oranı, stok bekleme gün süresi, sevk süresi ve adresleme süresi gibi bilgiler raporla araçlarıyla raporlanabilmektedir.

4.3. Üçüncü Faz Çalışması (Third Phase Study)

Bu faz çalışmasında, tüm süreçlerin kurumsal kaynak planlama ERP sistemine aktarımı yapıldıktan sonra sistemde oluşan veriler ile süre tahminleme, makine duruş takibi ve üretim çizelgeleme çalışmaları yapılmıştır.

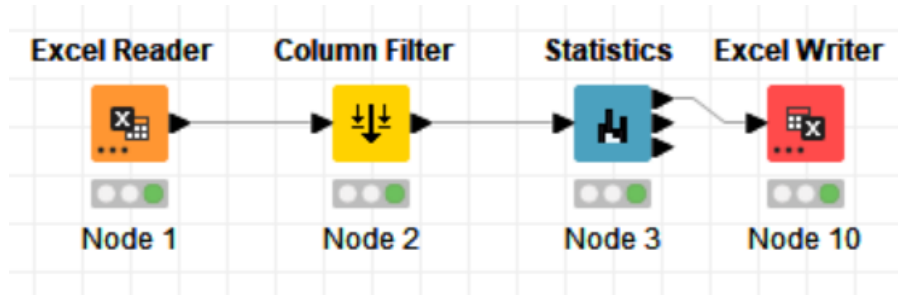
4.3.1. Süre Tahminleme (Time Estimation)

Üretim hattındaki makinelerden alınan proses bazlı süreler ile üretilecek ürüne ait nitelikler arasında bağlantı kurularak herhangi bir ürünün prosese girdiğinde ne kadar sürede tamamlanacağı dört farklı algoritma ile Knime platformunda denenmiştir. Bunun için kayıtlara ait; tedarik, klasman, kumaş, serim yönü, personel ismi, makine hızı, adet, toplam ağırlık ve süre ile ilgili bilgiler sistemden alınmış ve bir kısmı Tablo 5’de verilen 2000 adet veriden oluşan veri seti oluşturulmuştur.

Tablo 5. Örnek veri seti

| RowID | Tedarik | Klasman | Kumaş | Serim Yönü | Personel İsmi | Makine Hızı | Adet Aralık | Top Ağırlık | Süre (Dk) |
|-------|-------------|---------|---------|------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Row0 | Kız Çocuk | Tayt | LYC SUP | Kapak | Personel4 | Yavaş | 0-1000 | 133 | 48 |
| Row1 | Bebek | Swt | 3IP | Tek | Personel4 | Hızlı | 2000-3000 | 672 | 74 |
| Row2 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel8 | Hızlı | 2000-3000 | 570 | 85 |
| Row3 | Bayan Büyük | Tnk | LYC SUP | Kapak | Personel2 | Orta | 0-1000 | 370 | 50 |
| Row4 | Kız Çocuk | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel5 | Hızlı | 2000-3000 | 241 | 68 |
| Row5 | Yenıdoğan | Tulum | LYC SUP | Tek | Personel10 | Yavaş | 4000-5000 | 426 | 81 |
| Row6 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel11 | Orta | 2000-3000 | 461 | 119 |
| Row7 | Erkek Büyük | Sort | SUP | Kapak | Personel5 | Hızlı | 1000-2000 | 438 | 73 |
| Row8 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | TTP | Kapak | Personel5 | Hızlı | 2000-3000 | 541 | 67 |
| Row9 | Garnı | Garnı | RIB | Kapak | Personel4 | Yavaş | 0-1000 | 136 | 25 |
| Row10 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel11 | Hızlı | 0-1000 | 181 | 44 |
| Row11 | Bayan Büyük | U.Kol | LYC SUP | Kapak | Personel2 | Yavaş | 0-1000 | 321 | 56 |
| Row12 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel11 | Hızlı | 1000-2000 | 273 | 65 |
| Row13 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | SUP | Kapak | Personel5 | Hızlı | 1000-2000 | 375 | 84 |
| Row14 | Erkek Büyük | Kk.Tsh | TTP | Kapak | Personel4 | Hızlı | 0-1000 | 155 | 53 |
| Row15 | Bebek | Kk.Tsh | SUP | Tek | Personel8 | Hızlı | 4000-5000 | 327 | 110 |
| Row16 | Erkek Çocuk | Swt | 3IP | Kapak | Personel9 | Hızlı | 0-1000 | 161 | 33 |
| Row17 | Kız Çocuk | U.Kol | 3IP | Kapak | Personel8 | Hızlı | 0-1000 | 160 | 28 |
| Row18 | Bayan Büyük | U.Kol | LYC SUP | Kapak | Personel2 | Yavaş | 0-1000 | 328 | 57 |
| Row19 | Erkek Büyük | Sort | SUP | Kapak | Personel7 | Orta | 1000-2000 | 350 | 77 |
| Row20 | Bayan Büyük | Atlet | VIS SUP | Kapak | Personel2 | Yavaş | 1000-2000 | 454 | 53 |

Veri seti knime platformuna alınarak istatistiksel değerleri Şekil 16’daki “statistics” modülü kullanılarak çıktısı alınmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 6’da verilmiştir.

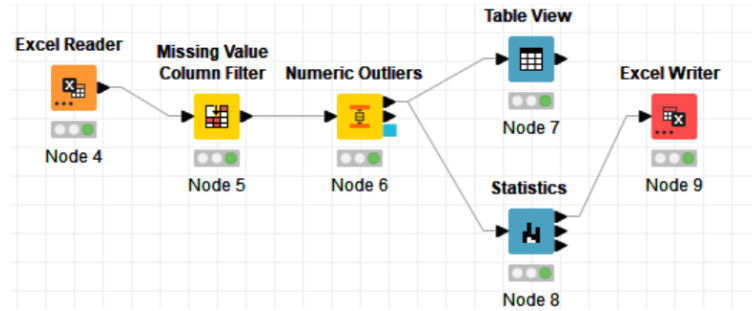


Şekil 16. Knime statistics modülü

Tablo 6. Knime istatistik sonuçları

| Kolon | Min. | Max. | Ortalama | Standart sapma | Varyans | Skewness | Kurtosis | Genel toplam |
|-----------|------|------|----------|----------------|---------|----------|----------|--------------|
| Süre (Dk) | 10 | 171 | 59,706 | 25,637 | 657,256 | 1,1196 | 1,9634 | 16419,383 |

Veriler alındıktan sonra temizleme, eksik verilerin tamamlanması, aykırı verilerin bulunması ve ilişkisiz olan alanların veri setinden çıkarılması gibi ön hazırlık çalışmaları Şekil 17’de gösterildiği gibi yapılmıştır.



Şekil 17. Knime ön işleme yapılmış veri ve statistics modülü

Ön hazırlık çalışmalarının ardından alınan istatistik değerleri Tablo 7’de verilmiştir. Eksik verilerin tamamlanması ve aykırı verilerin veri setinden çıkarılması ile standart sapma ve varyans gibi değerlerin düştüğü görülmüştür. Böylelikle, ön hazırlık yapılan veri seti süre tahminleme algoritmalarında kullanılmıştır.

Tablo 7. Knime ön işleme yapılmış veri istatistik sonuçları

| Kolon | Min. | Max. | Ortalama | Standart sapma | Varyans | Skewness | Kurtosis | Genel toplam |
|-----------|------|------|----------|----------------|---------|----------|----------|--------------|
| Süre (Dk) | 10 | 119 | 57,317 | 21,704 | 471,088 | 0,5070 | -0,2708 | 15303,883 |

Ön hazırlıktan alınan veri setinin *test* ve *eğitim* verileri olarak bölünmesi için Knime Analytics içerisinde bulunan “Partitioning” modülü kullanılmıştır. Eğitim veri seti kullanılarak dört adet model oluşturulmuş ve oluşturulan model diğer veri setleri ile çalıştırılarak sonuçlar incelenmiştir. Modeller lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli regresyon ağaçları ve rassal orman regresyon algoritması kullanılarak oluşturulmuştur. Modeller ile numerik değere sahip süre (dk) kolonu tahminleme çalışması yapılmıştır. Bu modellerin eğitilmesi ve test edilmesi yine Knime Analytics üzerinde bulunan modüller ile yapılmıştır. Model oluşturma ve test işlemi tamamlandıktan sonra Knime üzerinden bulunan “scorer” modülü kullanılarak başarı oranları çıkarılmıştır. Değişkenler arasındaki doğrusal ilişki var olup olmadığı ve algoritmanın modelimize uygunluğunun tespiti için ilk olarak Şekil 18’de gösterilen Knime Linear Regression modülü ile lineer regresyon algoritması modele uygulanarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Linear Regression modülünde veri setinde sayısal değerlere sahip olan Toplam Ağırlık ve Süre (Dk) arasındaki ilişkiye bakılarak test verisindeki Süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra, Knime Polynomial Regression modülü kullanılarak polinomal regresyon algoritması ile tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Polynomial Regression modülünde de aynı şekilde veri setinde sayısal değerlere sahip olan Toplam Ağırlık ve Süre (Dk) arasındaki ilişkiye bakılarak test verisindeki Süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Üçüncü olarak hem regresyon hem de sınıflandırma problemlerinde başarılı bir makine öğrenmesi algoritması olan gradyan destekli karar ormanı regresyonu algoritması modele uygulanmıştır. Knime Gradient Boosted Trees Regression modülü kullanılarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Gradient Boosted Trees Regression modülünde veri setinde bulunan nümerik ve nominal değerler birlikte kullanılarak test verisindeki süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Son olarak birden fazla karar ağacını kullanarak daha uyumlu modeller üretebilen ve isabetli tahminlerde bulunmaya yarayan rassal orman regresyon algoritması modele uygulanmıştır. Knime Random Forest Regression modülü kullanılarak tahminleme yapılmış ve scorer modülünden başarı oranları alınmıştır. Knime Random Forest Regression veri setinde bulunan nümerik ve nominal değerler birlikte kullanılarak test verisindeki süre (Dk) sayısal değerinin tahminlenmesi sağlanmıştır.

Algoritmalar için oluşturulan modellerin tahminleme sonuçlarının değerlendirilmesinde R^2 , MAE, MSE, RMSE ve MAPE performans metrikleri kullanılmıştır. Tüm algoritmalar için oluşturulan modellerden elde edilen değerlendirme sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8. Tüm modellerden elde edilen performans değerlendirme metrikleri sonuçları

| Performans Değerlendirme Metrikleri | Lineer Regresyon | Polinomal Regresyon | Gradyan Destekli Karar Ormanı Regresyonu | Rassal Orman Regresyonu |
|-------------------------------------|------------------|---------------------|--|-------------------------|
| R^2 | 0,339 | 0,301 | 0,256 | 0,384 |
| MAE | 18,018 | 17,189 | 16,506 | 14,637 |
| MSE | 618,792 | 529,120 | 530,386 | 385,607 |
| RMSE | 24,876 | 23,003 | 23,03 | 19,637 |
| MAPE | 0,282 | 0,419 | 0,296 | 0,364 |

Tablo 8’de yer alan özet tablodaki verilere göre en yüksek R^2 değeri 0,384 ile rassal orman regresyonu modelinden elde edilmiştir. Aynı zamanda 14,687 MAE, 385,607 MSE ve 19,637 RMSE değerleri ile en düşük hata metrikleri de rassal orman regresyonu modelinden elde edilmiştir. Dolayısıyla bu değerlerin en düşük olduğu modelin, veri setiyle en iyi uyumu sağlayacağı öngörüldüğü için yapılan tahminleme çalışmaları için en iyi uyumu rassal orman regresyonu modelinin sağladığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı rassal orman regresyonu algoritması ERP sistemi planlama modülü içerisine aktarılmıştır. Böylelikle, sistemde proses ve ürün niteliği bazında tutulan veriler üretim devam ettikçe sahadan alınmakta ve sanal ortamda büyük veri olarak depolanmaktadır. Böylelikle, algoritma büyük veriden beslenerek veri hacmi arttıkça daha doğru bir tahminleme sunmaktadır.

4.3.2. Makine Duruş Takibi (Machine Downtime Tracking)

Üretim hattında yer alan makineler üzerindeki sensörler ve makine operatörleri aracılığı ile Şekil 18’de gösterilen ERP makine duruş, bakım ve onarım modülü oluşturularak makine ile ilgili çalışma hızı, çalışma süresi, bekleme süresi gibi verilerin ilgili ürün ve hat için tutulması sağlanmıştır. Hat duruşu verileri daha sonraki çalışmalarda üretim çizelgeleme modülünde hat dengeleme ve çizelgelemede kullanılacaktır.

Şekil 18. ERP makine duruş, bakım ve onarım modülü

4.3.3. Üretim Çizelgeleme (Production Scheduling)

Uygulamadaki çizelgeleme çalışmasında, 5 hat ve 3 iş için alınan tahminleme süreleri ve hat doluluğu gibi veriler referans alınarak üretim çizelgeleme çalışması yapılmıştır. Çalışma yapılırken ham madde kalite kontrol sonucu, hatta çalışan personel, makine bakım ve arızaları, standart zaman ve hat doluluğu gibi parametreler sistem üzerinden alınarak üretim hattında üretilen ürünlerin tahmin edilen sürelerine bu parametrelere özel ağırlıklandırma yapılarak hat doluluğu hesaplanmıştır. Hat doluluk durumuna ve hat üzerinde çalışan personel bilgisine göre ürünlerin çizelgelemesinin sistem tarafından yapılıp çalışan personelin ekranlarına bilgilerin iletilmesi sağlanmıştır. Çalışmada üretim hattında tamamlanma zamanı,

toplam akış zamanı ve makinelerin toplam boş bekleme zamanının minimum olacak şekilde sonuçlar elde edilmesi amaçlanmıştır. Ancak, çizelgeleme çalışmasının geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bilgi teknolojilerinin hızlı gelişimi ile birlikte, son yıllarda tüm sektörlerde ürünlere yönelik üretim görevlerinin sayısı önemli ölçüde artmış ve bu da ürün verilerinin miktarında hızlı bir artışa neden olmuştur. Bu devasa miktardaki verinin gerçek zamanlı olarak toplanması ve sınıflandırılması ve bu verilerin süreç izlenebilirliğini ve ürün tasarımı ve sürecinin sürekli iyileştirilmesini sağlamak için yapısal olarak yönetilmesi ve analiz edilmesi temel veri yönetimi konuları haline gelmiştir. Verilerin artmasıyla birlikte artan dijitalleşme herkes tarafından benimsenen bir durum haline gelmiştir. Özellikle IoT, bulut bilişim, büyük veri analitiği ve yapay zeka gibi yeni nesil bilgi teknolojilerinin ortaya çıkmasıyla birlikte dijitalleşme süreci de büyük ölçüde hızlanmıştır. Dijitalleşme sürecindeki verileri kullanan teknolojilerden biri de dijital ikizdir. Dijital ikiz, çift yönlü etkileşimler yoluyla birbirleriyle karşılıklı olarak iletişim kuran, teşvik eden ve birlikte gelişen organik bir fiziksel varlık ve bunun dijitalleştirilmiş temsili anlamına gelmektedir. Dijital ikizde fiziksel dünyadaki varlıklar, davranışlar ve ilişkiler, aslına uygun sanal modeller oluşturmak için bütünsel olarak dijitalleştirilir. Oluşturulan bu sanal modeller ise fiziksel dünyadaki gerçek dünya verilerine bağlı olmaktadır. Dijital ikiz, makinelerin veya sistemlerin sanal kopyalarını oluşturarak endüstride devrim yaratmakta ve birçok şirket tarafından sorunları tespit etmek ve verimliliği artırmak için halihazırda kullanılmaktadır. Ayrıca dijital ikiz sistemleri, müşteri taleplerini hızlı bir şekilde anlamada, modellerdeki zayıflıkları erken belirlemede ve hatta tahmin etmede, değişen çevreye zamanında yanıt vermek için üretim süreçlerini kontrol etmede ve tesisi optimize etmek için değerli önerilerde bulunmada yardımcı olabilen ürün tasarımı ve üretiminde yaygın olarak uygulanmaktadır. Dijital ikizin, sistem mimarilerinin mevcut ve gelecekteki koşullarını temsil etme, tahmin etme ve yönetme konusunda potansiyel olarak geniş bir uygulama beklentisine sahip olduğu kanıtlanmıştır. Dijital ikizin üretimdeki bu başarısı nedeniyle, tüm sektörlerde dijital gelişmeyi desteklemek için siber-fiziksel model oluşturmaya yönelik çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, hazır giyim sektöründe faaliyet gösteren öncü bir firmanın bir üretim tesisinde, süreçlerin dijital ikiz modelinin oluşturulabilmesi için altyapı geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmada ilk olarak, tüm süreçlerde süreç haritaları oluşturularak süreç geliştirme çalışmaları sistem üzerine aktarılmıştır. Sürekli değişen verilerin sensörler ve arayüzler ile alınması, işlenmesi, depolanması ve raporlanması sağlanarak manuel yürütülen süreçlerin sistem üzerinden takip edilmesi ve yönetilmesi sağlanmıştır. Makine öğrenmesi yöntemlerinden olan lineer regresyon, polinomal regresyon, gradyan destekli karar ormanı regresyonu ve rassal orman regresyon algoritmaları kullanılarak bir ürünün üretim süresi tahmin edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen model sonuçlarında en yüksek R^2 ve en düşük MAE, MSE ve RMSE hata metrik değerlerine sahip olan rassal orman regresyon algoritması en uygun algoritma olarak tespit edilmiştir. Daha sonra rassal orman regresyonu modeli ERP altyapısına entegre edilmiştir. Tahminleme ile ürünler için klasman ve tedarik bazında standart süreler elde edilmesi sağlanmış olup bu standart süreler ile maliyetlendirme, verimlilik ölçme, raporlama ve performans değerlendirme gibi çalışmalar yapılmıştır. Tahminlemeyle, farklı niteliklere sahip herhangi bir ürün üretim hattına girdiğinde makine öğrenmesi algoritması ile üretim süresinin tahminlenmesi sağlanmıştır. Bu durum daha önce üretilmemiş çeşitlilikteki ürünler için de maliyetlendirme ve üretim planlama gibi çalışmaların yapılabilmesini sağlamıştır. Tahmin edilen üretim süreleri ve hat üzerindeki çeşitli parametrelere göre üretim çizelgeleme çalışması tasarımı yapılmış olup geliştirme ve testlerden sonra uygulamaya alınacak olup hat doluluğuna göre sistemin kendi kendine karar vererek üretim çizelgeleme yapması öngörülmektedir. Çizelgeleme çalışmasından sonra sistemin termin ve üretim süresine göre otomatik sevk planlama yapması sağlanıp uçtan uca kendi kendini yönetebilen bir sistem kurulması hedeflenmektedir. Makine bakım ve onarım modülünün kullanılmaya başlanması ile duruş takibinin yapılması sağlanarak önleyici bakım ile verimlilikte artış hedeflenmiştir.

Sistemden sürekli beslenen büyük veri ile daha doğru bir tahminleme yapılacağı öngörülmektedir. Tahmin edilen süreler ile her bir ürün için standart süre belirlenmiş olup bu standart süreler ile maliyetlendirme, performans değerlendirme ve işletme verimliliğinin ölçülmesi gibi çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada kendi kendine karar verebilecek bir sistem için altyapı çalışmaları oluşturulmuş olup bundan

sonraki süreçlerde fiziksel ortamdan alınan verilerin işlenmesiyle sanal ortamdaki modelin çalışması ve üretimi yönlendirmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Karagöz, A., Yıldız, A. (2019). Dijital ikiz teknolojisinin üretim ve tasarım sistemlerinde kullanılması. 5. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, 21-22 Aralık, İstanbul, Türkiye.
- [2] Carolis, A., Macchi, M., Negri, E., Terzi, S. (2017). Guiding manufacturing companies towards digitalization a methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalization roadmap. In 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), IEEE, 487-495.
- [3] Tao, F., Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. IEEE Access, 5, 20418-20427.
- [4] Cattaneo, L., Macchi, M. (2019). A digital twin proof of concept to support machine prognostics with low availability of run-to-failure data. IFAC-PapersOnLine, 52(10), 37-42.
- [5] Barricelli, B. R., Casiraghi, E., Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. IEEE access, 7, 167653-167671.
- [6] Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., Holmström, J. (2019). Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. IEEE Access, 7, 147406-147419.
- [7] Kiraz, A., Canpolat, O., Ozkurt, C., Taskin, H., Sarp, E. (2020). Examination of the criteria affecting Industry 4.0 with structural equation model and a pilot study. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 35(4), 2183-2196.
- [8] Bortolini, M., Ferrari, E., Gamberi, M., Pilati, F., Faccio, M. (2017). Assembly system design in the industry 4.0 era: a general framework. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 5700-5705.
- [9] Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., ... Nee, A. Y. (2019). Digital twin-driven product design framework. International Journal of Production Research, 57(12), 3935-3953.
- [10] Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 1, 1-7.
- [11] Glaessgen, E., Stargel, D. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference, 1818.
- [12] Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 567-572.
- [13] Qi, Q., Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360-degree comparison. IEEE Access, 6, 3585-3593.
- [14] Tao, F., & Qi, Q. (2019). Make more digital twins. Nature, 573, 490-491.
- [15] Wang, K. J., Lee, Y. H., Angelica, S. (2021). Digital twin design for real-time monitoring—a case study of die cutting machine. International Journal of Production Research, 59(21), 6471-6485.
- [16] Abramovici, M., Göbel, J. C., Dang, H. B. (2016). Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems. CIRP Annals, 65(1), 185-188.
- [17] Schluse, M., Rossmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In 2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE), IEEE, 1-6.

- [18] Kraft, E. M. (2016). The air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge. In 54th AIAA aerospace sciences meeting, 0897.
- [19] Liu, Z., Chen, W., Zhang, C., Yang, C., Cheng, Q. (2021). Intelligent scheduling of a feature-process-machine tool supernetwork based on digital twin workshop. *Journal of manufacturing systems*, 58, 157-167.
- [20] Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141-144.
- [21] Tuegel, E. J., Ingraffea, A. R., Eason, T. G., Spottswood, S. M. (2018). Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. *International Journal of Aerospace Engineering*, 154798.
- [22] Lee, J., Kao, H. A., Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
- [23] Qi, Q., Tao, F., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., ... Nee, A. Y. C. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21.
- [24] Zheng, Y., Yang, S., Cheng, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1141-1153.
- [25] Gockel, B., Tudor, A., Brandyberry, M., Penmetsa, R., Tuegel, E. (2012). Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structural dynamics and materials conference, 1813.
- [26] Seshadri, B. R., Krishnamurthy, T. (2017). Structural health management of damaged aircraft structures using digital twin concept. In 25th AIAA/AHS Adaptive Structures Conference, 1675.
- [27] Um, J., Weyer, S., Quint, F. (2017). Plug-and-Simulate within modular assembly line enabled by digital twins and the use of automationML. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 15904-15909.
- [28] Zhang, H., Liu, Q., Chen, X., Zhang, D., Leng, J. (2017). A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line. *IEEE Access*, 5, 26901-26911.
- [29] Magargle, R., Johnson, L., Mandloi, P., Davoudabadi, P., Kesarkar, O., Krishnaswamy, S., ... Pitchaikani, A. (2017). A simulation-based digital twin for model-driven health monitoring and predictive maintenance of an automotive braking system. In Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 132, 35-46.
- [30] Vathoopan, M., Johny, M., Zoitl, A., Knoll, A. (2018). Modular fault ascription and corrective maintenance using a digital twin. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1041-1046.
- [31] Coronado, P. D. U., Lynn, R., Louhichi, W., Parto, M., Wescoat, E., Kurfess, T. (2018). Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of manufacturing systems*, 48, 25-33.
- [32] Cunbo, Z., Liu, J., Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The international journal of advanced manufacturing technology*, 96(1-4), 1149-1163.
- [33] Liau, Y., Lee, H., Ryu, K. (2018). Digital Twin concept for smart injection molding. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 324(1), IOP Publishing, 012077.
- [34] Botkina, D., Hedlind, M., Olsson, B., Henser, J., Lundholm, T. (2018). Digital twin of a cutting tool. *Procedia Cirp*, 72, 215-218.

- [35] Guivarch, D., Mermoz, E., Marino, Y., Sartor, M. (2019). Creation of helicopter dynamic systems digital twin using multibody simulations. *CIRP Annals*, 68(1), 133-136.
- [36] Guo, J., Zhao, N., Sun, L., Zhang, S. (2019). Modular based flexible digital twin for factory design. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1189-1200.
- [37] Mukherjee, T., DebRoy, T. (2019). A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Applied Materials Today*, 14, 59-65.
- [38] Chakshu, N. K., Carson, J., Sazonov, I., Nithiarasu, P. (2019). A semi-active human digital twin model for detecting severity of carotid stenoses from head vibration—A coupled computational mechanics and computer vision method. *International journal for numerical methods in biomedical engineering*, 35(5), e3180.
- [39] Shim, C. S., Dang, N. S., Lon, S., Jeon, C. H. (2019). Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. *Structure and Infrastructure Engineering*, 15(10), 1319-1332.
- [40] Ghosh, A. K., Ullah, A. S., Kubo, A. (2019). Hidden Markov model-based digital twin construction for futuristic manufacturing systems. *AI EDAM*, 33(3), 317-331.
- [41] Coraddu, A., Oneto, L., Baldi, F., Cipollini, F., Atlar, M., Savio, S. (2019). Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling. *Ocean Engineering*, 186, 106063.
- [42] Bao, J., Guo, D., Li, J., Zhang, J. (2019). The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, 13(4), 534-556.
- [43] Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by digital twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974.
- [44] Qian, W., Guo, Y., Cui, K., Wu, P., Fang, W., Liu, D. (2021). Multidimensional data modeling and model validation for digital twin workshop. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3), 031005.
- [45] Suljagic, H., Celebi, N. (2021). Obtaining a digital twin of a low-cost robot arm. *Proceedings of the 6th International Student Symposium 1- Engineering Sciences*, 118-126.
- [46] White, G., Zink, A., Codecá, L., Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064.
- [47] Burgos, D., Ivanov, D. (2021). Food retail supply chain resilience and the COVID-19 pandemic: A digital twin-based impact analysis and improvement directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102412.
- [48] Yi, Y., Yan, Y., Liu, X., Ni, Z., Feng, J., Liu, J. (2021). Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 94-107.
- [49] Priyanka, E. B., Thangavel, S., Gao, X. Z., Sivakumar, N. S. (2021). Digital twin for oil pipeline risk estimation using prognostic and machine learning techniques. *Journal of Industrial Information Integration*, 100272.
- [50] Choi, S. H., Park, K. B., Roh, D. H., Lee, J. Y., Mohammed, M., Ghasemi, Y., Jeong, H. (2022). An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102258.

- [51] Lari, K. S., Davis, G. B., Rayner, J. L. (2022). Towards a digital twin for characterising natural source zone depletion: A feasibility study based on the Bemidji site. *Water Research*, 208, 117853.
- [52] Gao, Y., Chang, D., Chen, C. H., Xu, Z. (2022). Design of digital twin applications in automated storage yard scheduling. *Advanced Engineering Informatics*, 51, 101477.
- [53] Granacher, J., Nguyen, T. V., Castro-Amoedo, R., Maréchal, F. (2022). Overcoming decision paralysis-A digital twin for decision making in energy system design. *Applied Energy*, 306, 117954.
- [54] Yang, X., Ran, Y., Zhang, G., Wang, H., Mu, Z., Zhi, S. (2022). A digital twin-driven hybrid approach for the prediction of performance degradation in transmission unit of CNC machine tool. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102230.
- [55] Fang, X., Wang, H., Li, W., Liu, G., Cai, B. (2022). Fatigue crack growth prediction method for offshore platform based on digital twin. *Ocean Engineering*, 244, 110320.

Biomaterials Used in Additive Manufacturing Technologies and Biomedical Applications

Esra ÖZMEN¹  Cem ERTEK^{2,*} 

¹Sivas Cumhuriyet University, Graduate School of Naturel and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Review article
Received: 29.07.2022
Revision: 26.08.2022
Accepted: 1.09.2022

Highlights

- JSON.
- MongoDB.
- Location Services.

Keywords

Additive manufacturing technologies,
Biomaterials,
Biomedical applications

In this study, additive manufacturing technologies, the types of biomaterials used in the biomedical field, their basic properties and the properties that a good biomaterial should have, their advantages and disadvantages, their use in additive manufacturing techniques and the applications of additive manufacturing techniques in the biomedical field are summarized.

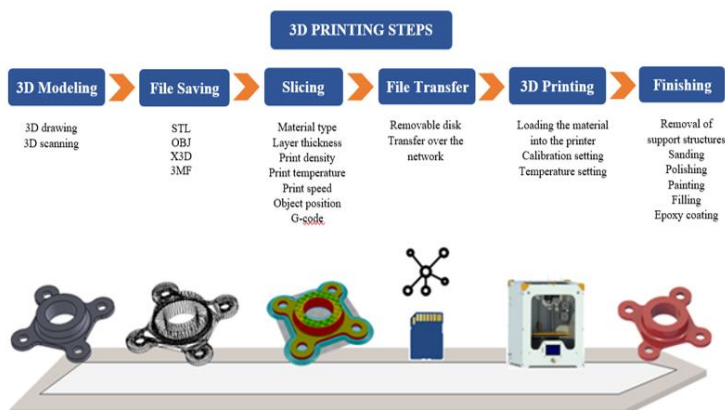


Figure A. Steps of the 3D printing (additive manufacturing) process [5]

Purpose: With the application of additive manufacturing techniques in the biomedical field, biomaterials have also become important for additive manufacturing techniques. Apart from metal and ceramic biomaterials, polymer and composite biomaterials, which have an increasing use in the biomedical field in recent years, have been used in additive manufacturing techniques in various studies. The aim of the article is to provide information about the additive manufacturing method and the studies on the production of long-lasting parts that are fully compatible with the body, do not have allergic and toxic properties, and can integrate with the tissue.

Results: In general, when the studies carried out until today are examined, it can be said that the use of additive manufacturing technologies in the biomedical field provides great advantages, the use of polymer materials is widespread and gives positive results, the properties that a good biomaterial should have are found in polymers, and the mechanical properties can be improved by using composite materials when necessary.

Conclusion: Work continues on the production of long-lasting parts that are fully compatible with the body, do not have allergic and toxic properties, and can integrate with the tissue. In the future, by using additive manufacturing techniques and different composite materials in the biomedical field, parts that are compatible with the body and have higher mechanical strength can be developed. It is foreseen that the use of polymer-ceramic composite materials will become widespread and will be the most used materials in the biomedical field.



Biomaterials Used in Additive Manufacturing Technologies and Biomedical Applications

Esra ÖZMEN¹ Cem ERTEK^{2,*}

¹Sivas Cumhuriyet University, Graduate School of Naturel and Applied Sciences, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

²Sivas Cumhuriyet University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 58140, Merkez/SİVAS

Abstract

Additive manufacturing technologies are a technology that is widely used in many sectors today and enables the use of multiple materials in the manufacture of parts and it is also very important for biomedical applications. Additive manufacturing technologies have been highly preferred in the biomedical field in recent years due to offering personalized designs, it uses various biomaterials in applications such as implant and prosthesis manufacturing and the development of various medical devices.

In this study, additive manufacturing technologies are explained in general terms and information about biomaterials and the use of additive manufacturing in the biomedical field is presented.

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 29.07.2022
Düzeltilme: 26.08.2022
Kabul: 1.09.2022

Keywords

Additive manufacturing technologies,
Biomaterials,
Biomedical applications

Anahtar Kelimeler

Eklemele imalat teknolojileri,
Biyomalzemeler,
Biyomedikal uygulamalar

Eklemele İmalat Teknolojilerinde Kullanılan Biyomalzemeler ve Biyomedikal Uygulamaları

Öz

Eklemele imalat teknolojileri günümüzde birçok sektörde yaygın olarak yararlanılan, parça imalatında çoklu malzeme kullanımını mümkün kılan bir teknolojidir ve biyomedikal uygulamalar için de oldukça önemlidir. Eklemele imalat teknolojileri kişiye özel tasarımlar sunması nedeniyle son yıllarda biyomedikal alanında oldukça tercih edilmekte, implant ve protez imalatı, çeşitli tıbbi cihazların geliştirilmesi gibi uygulamalarda çeşitli biyomalzemeler kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, eklemele imalat teknolojileri genel hatları ile açıklanmış, biyomalzemeler ve biyomedikal alanda eklemele imalatın kullanımı hakkında bilgi sunulmuştur.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eklemele imalat, ortaya çıkışı ile devrim niteliğinde bir teknoloji olmuştur. Tasarım esnekliği sunan bu teknoloji, kompleks parça imalatını mümkün kılmanın yanı sıra sürecin iyileştirilmesi, parça imalatı için gerekli olan sürenin kısaltılması, parça mukavemetinin artırılması gibi önemli avantajlar da sunmaktadır. Günümüzde çok sayıda eklemele imalat tekniği mevcuttur. Bu tekniklerin temel prensibi, malzemelerin katmanlar halinde serilerek işlenmesine dayanmaktadır. Teknikler, kullanılan malzemeler ve çalışma prensiplerinin farklı olmasıyla birbirlerinden ayrılmaktadır.

Eklemele imalat teknolojileri havacılık, otomotiv, savunma sanayinde ve tasarım esnekliği ve kişiye özel tasarımların gerçekleştirilebilmesini sağlaması nedeniyle biyomedikal alanda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemelerin özellikleri nihai mamulün özelliklerini etkilemektedir. Bu teknolojide katmanların oluşumu, malzemenin ısı kaynağı tarafından bölgesel olarak ergitilmesiyle gerçekleştiğinden, genellikle kullanılacak olan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin önemli olduğu söylenebilir [1]. Özellikle biyomedikal alanda kullanılacak olan malzemelerde termofiziksel özelliklerin yanında biyoyoumluluk, biyobozunurluk, mekanik ve kimyasal dayanım gibi özellikler de aranır.

Eklemeli imalat tekniklerinin biyomedikal alanda uygulanması ile beraber biyomalzemeler de eklemeli imalat teknikleri için önemli hale gelmiştir. Metal ve seramik biyomalzemelerin dışında, son yıllarda biyomedikal alanda gittikçe büyüyen bir kullanım alanına sahip olan polimer ve kompozit biyomalzemeler, çeşitli çalışmalarda eklemeli imalat tekniklerinde kullanılmıştır.

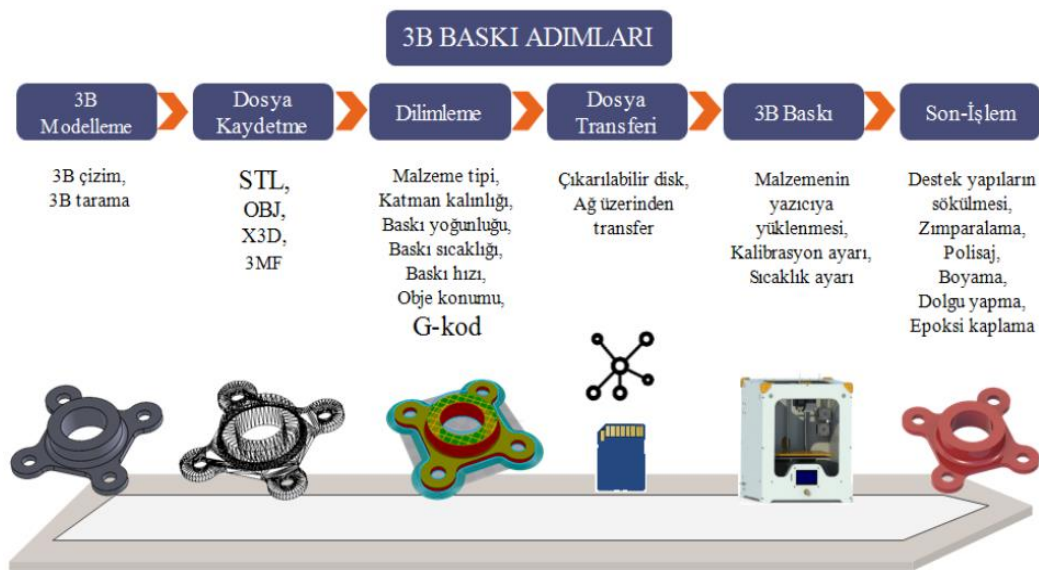
2. EKLEMELİ İMALAT (ADDITIVE MANUFACTURING)

Eklemeli imalat, yüksek tasarım özgürlüğü sunan, imalat sürecindeki ara işlemleri ortadan kaldırarak parça imalatına hız kazandıran ve bu özellikleri sayesinde geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak değil zorunluluk olarak ortaya çıkmış bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalat teknolojisi, malzemelerin katman katman serilerek işlenmesi prensibine dayanır. Eklemeli imalat, bir CAD yazılımıyla tasarımdan nihai mamulün elde edilmesine kadar olan süreçleri içerir [2].

Eklemeli imalat, esnek ve hızlı tasarımlar, uygun maliyetli mamuller, dayanıklı ve hafif parçalar, kolay erişim ve daha birçok avantaj sunduğu için sadece prototiplerle sınırlı kalmayıp, gerçek parça imalatı için de kullanılmaktadır [3].

Devrim niteliğinde olan eklemeli imalat teknolojisi, montajı yapılacak parça sayısını ve kaynak gibi birleştirme işlemlerini azaltarak parça mukavemetinin artmasını sağlar. Ayrıca geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında atık malzeme sonucu oluşan israfı en düşük seviyeye indirir. Bu imalat tekniği ile imal edilen parçalar genellikle yüksek mukavemet ve darbe dayanımı, düşük yoğunluk gibi iyi mekanik özellikler sergiler [4].

Hat kurulumu ve kalıp gerektirmeyen 3B baskı (eklemeli imalat) prosesi altı temel adımdan oluşur. Bu adımlar Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 3B baskı (eklemeli imalat) prosenin adımları [5]

Eklemeli imalat teknolojisi Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu (ASTM F42) tarafından 7 kategoride sınıflandırılmıştır:

1. Vat Fotopolimerizasyon (Vat Photopolimerization)
2. Bağlayıcı Jet (Binder Jetting)
3. Malzeme Jeti (Material Jetting)
4. Toz Yataklı Füzyon (Powder Bed Fusion)
5. Malzeme Ekstrüzyonu (Material Extrusion)
6. Doğrudan Enerji Biriktirme (Directed Energy Deposition)
7. Levha Laminasyon (Sheet Lamination)

Sınıflandırmadaki her bir kategori, imalat tanımına uygun olarak çeşitli eklemeli imalat tekniklerini içermektedir. Yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri Tablo 1’ de ait oldukları kategori, süreç tanımı ve temel özellikleri ile verilmiştir.

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri

| Eİ TEKNİĞİ | 3B BASKI KATEGORİSİ | SÜREÇ TANIMI | ÖZELLİKLER |
|------------|------------------------|---|---|
| SLA | Vat Fotopolimerizasyon | Sıvı haldeki fotopolimer reçinenin UV ışını ile kürlenmesi ile parça imalatı sağlanır. | -Yüksek çözünürlük ve detay -Yüksek baskı hızı -Yüksek maliyet |
| FDM | Malzeme Ekstrüzyonu | Nozul aracılığıyla dağıtılan malzemenin soğuyup katılaşması ile parça imalatı gerçekleştirilir. | -Düşük maliyet -Düşük çözünürlük -Düşük yüzey kalitesi -Çoklu malzeme kullanımı -Yüksek mukavemet |
| EBM | Toz Yataklı Füzyon | Bir elektron ışını tarafından metal tozların veya filamentlerin tamamen ergitilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir. | -Yüksek mukavemet -Düşük enerji tüketimi -Yüksek doğruluk ve detay |
| SLM | | Toz malzemenin bir lazer ışını ile tamamen ergitilerek birleştirilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir. | |
| SLS | | Toz malzemenin bir lazer ışını ile sinterlenerek birleştirilmesi ile parça imalatı gerçekleştirilir. | |

Eklemeli imalat teknolojisinin uygulaması yaygındır ve kullanım kolaylığı nedeniyle büyük endüstriyel uygulamalar, onu yüksek potansiyelli bir imalat tekniği haline getirmektedir [2]. Günümüzde eklemeli imalat teknolojisi, havacılık ve otomotiv sanayi, savunma sanayi, sağlık endüstrisi, elektronik ve yapı sektörü gibi çeşitli endüstriyel sektörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

3. BİYOMALZEMELER (BIOMATERIALS)

Niteliklerinin artırılabilmesi amacıyla senelerdir tıp ve mühendislik alanında çalışmalara konu olan biyomalzemeler, vücudun zarar gören doku ve organlarının yitirdiği fonksiyonlarını yeniden sağlayabilmek amacıyla kullanılan, doğal veya sentetik maddelerden imal edilen malzemelerdir [6]. Bu malzemeler, mühendislerle birlikte çalışan cerrahların uygulama alanlarından, mühendislerin, kimyagerlerin ve fizikçilerin hakim olduğu bir alana doğru yol almıştır [7].

3.1. Biyomalzeme Çeşitleri (Types of Biomaterials)

Biyomalzemeler; metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 ana kategoride incelenebilir. Bu kategorilerin avantajları ve dezavantajları Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Biyomalzemelerin sınıflandırılması [8]

| MALZEME TÜRÜ | AVANTAJLAR | DEZAVANTAJLAR |
|-----------------|---|--|
| METAL | <ul style="list-style-type: none"> - Yüksek dayanım - Yüksek gerilme direnci - Sert - Sünek | <ul style="list-style-type: none"> - Yüksek yoğunluk - Korozyona uğrayabilme |
| SERAMİK | <ul style="list-style-type: none"> - İyi biyouyumluluk - Korozyona dayanıklı - Bası kuvvetlerine dayanıklı | <ul style="list-style-type: none"> - Esnek değildirler - Kırılabilirler - Gerilme dayanımları düşüktür - Fabrikasyon zorlukları vardır |
| POLİMER | <ul style="list-style-type: none"> - Esnekler - Düşük yoğunluk - Kolay fabrikasyon | <ul style="list-style-type: none"> - Düşük dayanım - Zamanla deformasyona uğrayabilir |
| KOMPOZİT | <ul style="list-style-type: none"> - İnerttirler - Yüksek dayanım - İyi biyouyumluluk - Korozyona dayanıklı - Gerilme dirençleri yüksektir - İhtiyaca göre hazırlanabilir | <ul style="list-style-type: none"> - Malzeme fabrikasyonu zordur |

Metalik biyomalzemeler ya da diğer adıyla biyometaller, mükemmel elektriksel ve termal iletkenlikleri ve mekanik özellikleri nedeniyle biyomedikal alanında sıkça kullanılan malzemelerdendir. Metal ve metal alaşımları, sahip oldukları kristal yapılar ve güçlü metalik bağlar sayesinde üstün mekanik özellikler sergilediğinden biyomalzemeler içerisinde önemli bir yere sahiptirler [9]. Bazı metaller, mükemmel mekanik özellikleri ve korozyon dayanımları nedeniyle kemik plakaları ve vidalar, omurga sabitleme cihazları, diş implantları ve sert doku replasmanlarında kullanılır. Bununla birlikte bazı biyometallerin, çok

sert ve yüksek yoğunluğa sahip olmaları, düşük biyouyumlulukları, korozyona karşı dirençlerinin zayıf olması ve alerjik doku reaksiyonlarına sebep olabilmeleri gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır [10]. Örneğin korozyona karşı Ti oldukça dirençliken Mg zayıf bir dirence sahiptir ancak her iki metal de yüksek biyouyumluluk özelliği sunar.

Seramik biyomalzemeler, biyoinert (alumina, zirkonya) ve biyoaktif (hidroksiapatit, β -trikalsiyum fosfat, biyocamlar) seramikler olarak iki grup altında incelenebilir [11]. Biyoinert seramiklerde malzeme ile doku arasındaki etkileşim son derece yavaş olduğundan herhangi bir reaksiyon gerçekleşmemekte ve bu durumda malzeme yüksek ölçüde inertlik kazanmaktadır. Biyoinert seramikler dokularla etkileşimini mekanik bağ şeklinde gerçekleştirmektedir. Doku üzerinde olumsuz bir etki oluşturmayacak şekilde, kullanılan malzeme ile dokunun bir arada tutulması mekanik bağ ile sağlanır [12]. Biyoaktif seramikler kemikle etkileşime girdiğinde bağlanma gerçekleştirebilen seramiklerdir. Biyoaktif seramikler de genel olarak kalsiyum esaslı seramikler ve biyocamlar olarak iki kategoriye ayrılır [13]. Biyoaktif seramik malzemelerin biyoaktiviteleri yüksek olduğundan, doku hücrelerinin biyomalzeme içerisine doğru büyüme eğilimleri çok iyidir. Osseointegrasyon, biyouyumluluk ve korozyon dayanımı biyoaktif seramik malzemelerin sağladığı en önemli avantajlardır. Ancak, tokluk ve sünekliklerinin düşük, sertlik ve kırılgenliklerinin yüksek olması da önemli bir dezavantajdır.

Polimerler, çok büyük moleküllerden veya tekrar eden birçok alt birimden oluşan makromoleküllerden oluşan malzemelerdir. Biyopolimerler, tüm organizmaların büyüme döngüleri sırasında doğada oluşan polimerlerdir; bu nedenle doğal polimerler olarak da adlandırılırlar [14]. Polimerler, çok çeşitli mekanik, termal, elektriksel ve biyouyum özelliklerinden dolayı farklı uygulamalarda öne çıkan malzemelerdendir [15]. Özellikle son yıllarda tıbbi uygulamalar için kullanılan malzemeler arasında en çok öne çıkan grup polimerlerdir. Bu durumun nedeni polimerlerin sahip olduğu düşük yoğunluk, yüksek biyoinert ve elastik özellikler, sergiledikleri iyi biyouyumluluk, kolay fabrikasyon ve sundukları düşük maliyet avantajlarıdır. Fiziksel yapı olarak vücutta bulunan yumuşak dokulara benzerlik gösteren polimerler, vücudun kıkırdak, cilt ve damar gibi özel dokuya sahip bölgelerinde protez malzemesi olarak kullanılabilirler. Ancak, ortopedik alanda kullanıldıklarında düşük mekanik dayanım sergilemekte ve sterilizasyon işlemi gerçekleştirilirken polimer özellikleri etkilenmektedir [16]. Buna rağmen bu alanda yüksek potansiyele sahip malzemeler olduğu söylenebilir. Biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan polimerlere örnek olarak ABS, PCL, PLA, PLGA, PGA ve PEEK polimerleri verilebilir.

Kompozitler, belirgin şekilde farklı fizikokimyasal özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzeme veya fazdan oluşan ve özellikleri, bu malzemelerin özelliklerinin bir karışımı olan malzemelerdir [17]. Bu malzemelerin avantajı, bileşenlerin özellikleri ile kıyaslandığında önemli ölçüde değiştirilebiliyor olması ve ihtiyaç duyulan nitelikte oluşturulabilmesidir [18]. Kompozit malzemeler hazırlanırken, matris adı verilen bir malzeme içerisine çeşitli güçlendirici malzemeler eklenir [19]. Kompozit malzemelerin yüksek dayanımı ve düşük elastisite modülü, özellikle ortopedik uygulamalar için tercih edilmesini sağlamaktadır. İmplantlarda kullanılan kompozit malzemelerin, vücutta kullanılacağı alana uygun olarak, mekanik ve fizyolojik koşullara kolay uyum sağlayabilmesi için bileşimleri değiştirilebilir [20]. Korozyona direnç, metal yorgunluğunun ve kırılgenliğin azalması da kompozitlerin sağladığı diğer avantajlardır. Kompozitler, yumuşak doku implantlarında, ortopedi ve diş hekimliği uygulamalarında kullanılırlar [19].

3.2. Biyomalzeme Seçimi (Choosing Biomaterials)

Biyomalzemelerde bulunması oldukça önemli olan özellikler biyouyumluluk, biyobozunurluk, biyoaktivite ve osseointegrasyondur. Biyomalzemelerde bulunması istenen diğer temel özellikler ise mekanik ve kimyasal dayanımdır.

Biyoyumluluk, bir biyomalzemedeki dikkate alınması gereken en önemli özelliktir. Malzemenin vücudun mekanik davranışına ve vücut dokularına sağladığı fiziksel, kimyasal ve biyolojik olarak optimum uyumunu ifade eder [12]. Ayrıca biyouyumluluk, malzemenin belirli uygulamada uygun bir konakçı tepkisi ile kullanılabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir [11]. Biyouyumluluk terimi, bazı araştırmacılar tarafından bir biyomalzemenin yüzey ve yapısal uyumluluğu olarak ikiye ayrılmış ve bu şekilde tanımlanmıştır. Yüzey uyumluluğu, bir biyomalzemenin vücut dokularına fiziksel, kimyasal ve biyolojik

olarak sağladığı uyum olarak tanımlanırken yapısal uyumluluk ise malzemenin vücut dokularının mekanik davranışına sağladığı uyumdur [10].

Biyobozunurluk, biyomalzemenin vücut içerisinde belirli bir süre içerisinde doğal olarak parçalanmasıdır. Biyobozunur malzemeler zaman içerisinde biyolojik olarak bozunarak doku ile yer değiştirir. Özellikle ortopedik implant imalatında dikkate alınması gereken bir özelliktir.

Biyoaktivite, biyomalzemenin canlı doku ile ara yüzeyinde kuvvetli fiziksel bağ oluşturması ve bu sayede dokuya bağlanmasıdır. Biyoaktif malzemeler, doku ile malzeme arasında meydana gelen biyolojik tepkime sonucunda olumlu etkileşim ve birleşme sağlamalıdır. Ayrıca etkileşim içerisinde olduğu dokuyu iyileştirmeli ve yitirilmiş organ işlevlerini yerine getirmek amacıyla biyoaktif molekül salınımı gerçekleştirmelidir [6].

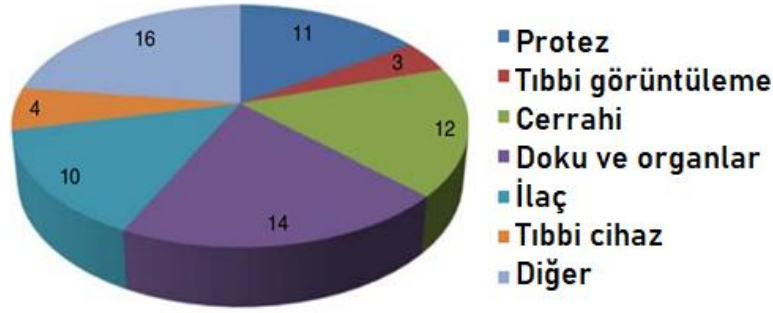
Osseointegrasyon, kemik dokusu ile implant yüzeyinde yapısal ve fonksiyonel bir bağlantının oluşması olarak tanımlanabilir. İmplantın vücut içerisine yerleştirilmesinden sonra implantı çevreleyen kemikler implantın yüzeyini kaplar ve bu şekilde implantın kemiğe tutunması sağlanmış olur. Duran veya hareket halinde olan insan bedeninde implantın ağırlık yüklenmelerine ve kas kasılmalarına vereceği yanıt aynı zamanda implantın osseointegrasyon kapasitesini de etkileyecektir [21]. Osseointegrasyonun başarılı bir şekilde sağlanmasında cerrahi yöntem ve implant tasarımı önemli rol oynamaktadır. Dolayısıyla implant tasarımına etki eden faktörler de osseointegrasyon için oldukça önemlidir. Özellikle kullanılan implantın düz bir yapıdan ziyade gözenekli yapıda olması, besin takviyesini, hücrelerin göçünü, osteoblastların çoğalmasını ve iskele hücre yapışmasını sağladığından osseointegrasyonu artırmaktadır. Osseointegrasyonun gerçekleşmediği durumlarda ise implantın kemiğe tutunması başarısız olmaktadır.

Gün içerisinde gerçekleştirilen aktiviteler sırasında kemikler farklı gerilmelere maruz kalmaktadır. Ayrıca, hareket halindeyken ortopedik malzemeler de çok sayıda yüklemeye maruz kaldıkları için kullanılan biyomalzemelerin mekanik dayanımları ve yorulma dayanımları oldukça önem taşımaktadır [22]. Biyomalzemelerin genel mekanik özellikleri, çekme ve basma mukavemetleri, akma mukavemeti, elastik modülü, sertlik ve işlenebilirlik miktarıdır. Kullanılan biyomalzemenin mekanik etkilerden dolayı zarar görmesi, malzemenin biyomekanik olarak uygun olmadığını gösterir. Bu şekilde istenmeyen etkilerin oluşmaması için kullanılan biyomalzeme ile temas halindeki kemik dokusunun mekanik özelliklerinin birbirlerine oldukça yakın olması gerekmektedir. Mekanik özelliklerden biri olan elastik modülü değerleri arasında büyük fark olması durumunda gerilme kalkanı etkisi ortaya çıkar ve biyomalzeme ile kemiğin bütünleşmesi gerçekleşemez [6]. Gerilme kalkanı etkisi implant tasarımındaki önemli problemlerden biridir ve implantasyon işleminden sonra revizyon ameliyatlarına ihtiyaç duyulmasına neden olur [23].

Biyomalzeme seçimini etkileyen bir diğer özellik de malzemenin korozyona karşı gösterdiği dayanımdır. Malzeme bilimi alanında, biyomalzemelerin akut kalp hastalıkları, artrit, osteoporoz ve diğer eklem komplikasyonlarından mustarip insanların hayatta kalması için gerekli olması nedeniyle biyomalzemelerin korozyonu büyük önem taşımaktadır [24]. Korozyon, metal veya alaşımlarının buldukları ortam ile aralarında kimyasal bir tepkime gerçekleşmesi sonucu bozunması ve özelliklerini kaybetmesi olarak tanımlanabilir. İnsan vücudu biyometaller için oldukça korozif bir ortamdır [10]. Bu nedenle insan vücudunda korozyon dayanımı iyi olmayan bir malzeme kullanılması, malzemenin zayıflaması ve korozyon ürünlerinin hücrelere zarar vermesi ile sonuçlanır.

4. EKLEMELİ İMALAT TEKNİKLERİNİN BİYOMEDİKAL ALANDAKİ UYGULAMALARI (APPLICATIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNIQUES IN THE BIOMEDICAL FIELD)

Prototip hazırlama amacı ile imalat sektörüne giriş yapan eklemeli imalat teknolojisi, karmaşık şekilli parçaların imalatını mümkün kılma, kişiye özel tasarım ve sağlık masraflarını düşürme fırsatı sunması ile tıbbi sektöre de girmiştir. Günümüzde bu teknoloji, protez ve implantların, medikal cihazların ve teşhis cihazlarının imalatında önemli bir yere sahiptir. Daha iyi malzeme özellikleri, daha yüksek parça kalitesi, boyutsal doğruluk ve imalat maliyetinde yapılan nispi iyileştirmelerle sektörün ihtiyaç duyduğu karmaşık şekilli parçaların imalatı mümkün hale geldiğinden, eklemeli imalat teknolojisinin medikal alanda kullanımı ivme kazanmıştır [25].



Şekil 2. 3D baskı ile sağlık sektörünün farklı alanlarında yapılan uygulamalar [26]

Eklemeli imalat teknolojisi sayesinde, implantların imalat süresi geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında önemli ölçüde azaltılabilir. Ayrıca implantlar, kişinin anatomisine bağlı olarak da imal edilebildiğinden kişiye daha iyi uyum sağlayarak seri olarak imal edilen implantlardaki yaygın hata ve buna bağlı olarak ortaya çıkan başarısızlık olasılığını azaltmaktadır. Bunun yanı sıra, 3D baskı teknolojileri, biyomimetik yapıya sahip nesnelere elde etmek için oldukça uygundur. Çok karmaşık ve özel parçaların düşük maliyetli olarak imal edilebilmesi eklemeli imalatın medikal alandaki en önemli avantajıdır [27].

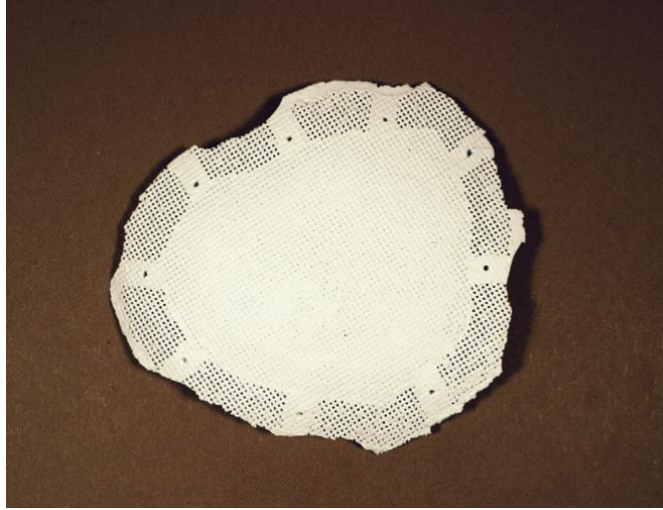
Eklemeli imalatın ortopedik ve dental implantlarda uygulanma, karmaşık geometriler ve yapılar elde edebilme, daha etkili kemik entegrasyonu için pürüzlü yüzeyler oluşturma ve implantların her hastanın bireysel ihtiyaçlarına uyacak şekilde kişiselleştirilmesine izin verme yeteneğinden önemli ölçüde yararlanır [28].

Eklemeli imalat teknolojileri ile medikal sektörde birçok alaşım türü elde edilebilmektedir. Çelik türleri (316L, 17-4PH), kobalt-krom bazlı alaşımlar (Co-Cr/Co-Cr-Mo), saf titanyum ve alaşımları (Ti6Al4V, CPTi) ve alüminyum alaşımları (AlSi10Mg) gibi biyometaller başarılı bir şekilde imal edilmiş ve medikal implant pazarında yerlerini almışlardır [29]. Doku mühendisliği çalışmaları doğrultusunda gerçekleştirilen 3B kemik iskelesi tasarımlarında Ca, Mg ve Fe öne çıkmaktadır. Ti ise gözenekli iskelelerde kemik rejenerasyonunun gerçekleşmesi amacıyla kullanılmıştır [30].



Şekil 3. CoCrMo alaşımının dental alandaki uygulaması [31]

Seramik biyomalzemeler implantların biyouyumluluğunu artırmak için metalik biyomalzemelere alternatif olarak geliştirilmiş ve eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılmıştır. Bununla beraber Ma vd. [32] tümör tedavisi ve kemik dokusu onarımında kullanılmak üzere 3B baskılı biyoseramik iskeleler imal etmiş ve kemik kusurlarının onarılmasında büyük potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir.



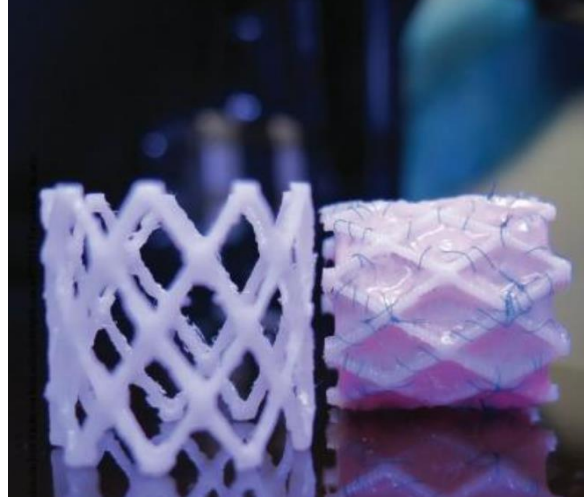
Şekil 4. *Kraniyofasiyal kemik kusuru için tasarlanmış HA implant [33]*

Kompozit malzemeler, ortopedik ve dental uygulamalarda sergilemiş oldukları yüksek dayanım ve yapısal uyumluluktan dolayı tercih edilmektedir. Jiao vd. [34], FDM yöntemi ile HA/PCL kompozit malzemesini kullanarak doku mühendisliği iskeleleri imal etmişlerdir. Çalışmada mekanik ve yapısal özellikler analiz edilmiş ve sonuçta HA/PCL kompozitinin eklemeli imalat tekniği ile kemik doku mühendisliği için potansiyel uygulamaya sahip olduğu belirtilmiştir.



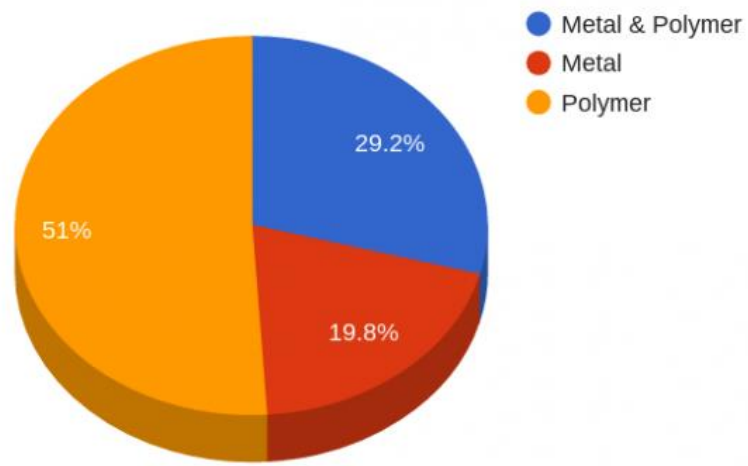
Şekil 5. *Biyoemilebilir polimer/hidroksiapatit hibrit malzemeli PEEK implantı [35]*

Polimer malzemeler için de geniş bir uygulama alanı sunan eklemeli imalat yöntemleri ile işitme cihazı ve kalp stentleri başta olmak üzere protez ve implant imalatı, kemik iskelelerinin geliştirilmesi gibi birçok uygulamada polimer malzemeler kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6. 3B yazıcı ile imal edilen polimer stent [36]

2016 Wohler Raporu'nda da eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzeme çeşitlerinin içerisinde polimer malzemelerin öne çıktığı görülmektedir (Şekil 3).



Şekil 7. 3D baskı teknolojilerinde kullanılan malzeme çeşitlerinin oranları [37]

Tablo 3. Medikal alanda polimer malzemelerle birlikte yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat teknikleri ve özellikleri [38]

| Eİ TEKNİĞİ | MALZEMELER | SINIRLAMALAR | FAYDALAR |
|------------|---|---|--|
| FDM | ABS Nylon PC PCL PLA PLLA PLGA PET-G TPC TPS | <ul style="list-style-type: none"> - Biyomedikal alanda kullanılan sınırlı malzeme seçimi - Daha kısa kullanım ömrü ve zayıf mekanik özellikler - Basılı nesnelerin düşük yüzey kalitesi - Biyomedikal implantlarda tercih edilmez. | <ul style="list-style-type: none"> - Çeşitli geometriler - Karmaşık yapılar ve şekil - Hazır filamentler - Uygun maliyet |
| SLA | PCL PEGDA PDL PDLLA PPF | <ul style="list-style-type: none"> - Sınırlı sayıda malzeme (foto-çapraz bağlanabilir bir malzemenin gerekliliği) - Sınırlı sayıda potansiyel malzeme (fotopolimerizasyon sırasında toksik maddeler) | <ul style="list-style-type: none"> - Yüksek boyutsal doğruluk - Karmaşık ayrıntılar - Pürüzsüz yüzey |
| SLS | PCL PEEK PVA PLGA PDLLA PCL/HA PEEK/HA | <ul style="list-style-type: none"> - Yüksek sıcaklıklı enerji kaynağı kullanma - Pahalı teknik - SLS cihazının büyük boyutu - Toz mikroyapısına ve lazerin nokta boyutuna bağlı çözünürlük | <ul style="list-style-type: none"> - Hızlı proses - Büyük boyutta ve karmaşık parçaların imalatı - Malzeme çok yönlülüğü - Tek bir üretim sürecinde üretilen küçük seriler - Yüksek parça doğruluğu |

Biyomedikal alanda eklemeli imalat teknolojisi ile polimer malzemeler kullanılarak yapılan ve olumlu sonuçlar veren çalışmalar mevcuttur.

Hutmacher vd. [39], çalışmalarında PCL kullanarak FDM yöntemi ile elde ettikleri yapı iskelelerini incelemiştir. PCL termoplastik işleme için uygun özelliklerinden dolayı seçilen bir polimerdir. Çalışmada gözenekli ve biyolojik malzeme olarak rezorbe edilebilen 3D yapı iskeleleri imal edilmiştir.

Çalışma sonucunda iskelelerin iyi mekanik özellikler sergilediği ve insan fibroblast ve periosteal hücre kültürü sistemleri ile mükemmel biyouyumluluk gösterdiği görülmüştür.

Geven vd. [40], orbit tabanı rekonstrüksiyonu için hastaya özel implantların sanal modellerinin oluşturulması için bir çalışma yapmışlardır. Sanal modeller, beş klinik vakanın klinik bilgisayarlı tomografi görüntüleri kullanılarak oluşturulmuştur. Çalışmada yüksek çözünürlüklü bir eklemeli imalat tekniği olan stereolitografi (SLA) kullanılmış ve kompozit implantlar imal etmek amaçlanmıştır. Bu nedenle biyolojik olarak rezorbe edilebilir, fotokürlenabilir poli(trimetilen karbonat) oligomerlerden ve osteoindüktif nano-hidroksiapatitten reçineler hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda, hazırlanan kompozit reçineler kullanılarak hastaya özel, homojen ve mekanik olarak stabil implantlar hazırlanabileceği ve stereolitografi tekniğinin homojen kompozitlerin imalatına izin verdiği belirtilmiştir.

Özsoy ve Kayacan [41], çalışmalarında FDM yöntemi ile biyomedikal alanda yaygın olarak kullanılan PLA malzemesi kullanmış ve kişiye özel hafifletilmiş kafatası implantının prototip imalatını gerçekleştirmişlerdir. Arı peteği mimarisinden yararlanarak hem hafif bir tasarım oluşturmuş hem de malzemenin tasarruf sağlanan bir implant elde etmişlerdir. Buna bağlı olarak da implantın kullanılabilirliğinin ve tercih edilebilirliğinin çok olması beklenmektedir.

Bahsedilen çalışmalar bu alanda yapılan araştırmaların yalnızca birkaçıdır. Benzer şekilde polimer malzemeler ve eklemeli imalat teknikleri kullanılarak biyomedikal alanda oldukça başarılı birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmalarda herhangi bir uyumsuzluk ya da zararlı bir oluşum gözlenmemiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada eklemeli imalat teknolojileri, biyomedikal alanda kullanılan biyomalzemelerin çeşitleri, temel özellikleri ve iyi bir biyomalzemenin taşınması gereken özellikler, avantajları ve dezavantajları, eklemeli imalat tekniklerinde kullanımları ve eklemeli imalat tekniklerinin biyomedikal alandaki uygulamaları özetlenmiştir. Vücutla tamamen uyumlu, alerjik ve toksik özellik taşımayan, doku ile bütünleşebilen uzun ömürlü parçaların imal edilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Genel olarak günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde eklemeli imalat teknolojilerinin biyomedikal alanda kullanımının oldukça büyük avantajlar sağladığı, polimer malzeme kullanımının yaygınlaştığı ve olumlu sonuçlar verdiği, iyi bir biyomalzemenin taşınması gereken özelliklerin polimerlerde bulunduğu ve gerektiğinde mekanik özelliklerin kompozit malzemeler kullanılarak iyileştirilebileceği söylenebilir.

Gelecekte biyomedikal alanda eklemeli imalat teknikleri ile farklı kompozit malzemeler kullanılarak hem vücuda olumsuz etkisi olmayan ve uyumlu hem de mekanik dayanımı daha yüksek parçalar geliştirilebilir. Özellikle polimer-seramik kompozit malzemelerin, kullanımının yaygınlaşacağı ve biyomedikal alanda en çok kullanılan malzemeler olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Özsolak O., “Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler”, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1): 9-14, (2019).
- [2] Kawalkar R., Dubey H. K., Lokhande, S. P., “A review for advancements in standardization for additive manufacturing”, *Materials Today: Proceedings*, 50:1983-1990, (2021).
- [3] Bhatia A., Sehgal A. K., “Additive manufacturing materials, methods and applications: A review”, *Materials Today: Proceedings*, 1-8, (2021).
- [4] Bozkurt Y., Özkan H. G., Karayel E., “Eklemeli imalat teknolojilerinin tıbbi ekipmanların üretiminde kullanımı”, *El-Cezeri*, 8(2): 962-980, (2021).
- [5] Sürmen H. K., “Eklemeli imalat (3B Baskı): Teknolojiler ve uygulamalar”, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2): 373-392, (2019).

- [6] Yılmaz Y., Avcı B., Demirören H., “Biyomalzeme sektöründe kullanılan titanyum ve alaşımları”, *Fourth International Symposium on Innovative Approaches in Engineering and Natural Sciences*, 4: 357-362, (2019).
- [7] Ratner B. D., Zhang G., “A history of biomaterials”, *Biomaterials science: An Introduction to Materials in Medicine*, Elsevier, (2020).
- [8] Kayacan M. C., Delikanlı Y. E., Duman B., Özsoy K., “Ti6Al4V toz alaşımı kullanılarak SLS ile üretilen geçişli (değişken) gözenekli numunelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(1): 127-143, (2018).
- [9] Gür A. K., Taşkın M., “Metalik biyomalzemeler ve biyoyum”, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 2(2): 106-113, (2004).
- [10] Pasinli A., “Biyomedikal uygulamalarda kullanılan biyomalzemeler”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(4): 25-34, (2004).
- [11] Güner A. T., Meran C., “Ortopedik implantlarda kullanılan biyomalzemeler”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1): 54-67, (2019).
- [12] Çırak Z. D., Yakıncı D. B., “Tıbbi uygulamalarda kullanılan biyoyumlu biyomalzemeler”, *İnönü Üniversitesi Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu Dergisi*, 8(2): 515-526, (2020).
- [13] Mahyudin F., Widhiyanto L., Hermawan H., “Biomaterials in orthopaedics”, In *Biomaterials and Medical Devices*. Springer, Cham, (2016).
- [14] Chandra R., Rustgi R., “Biodegradable polymers”, *Progress In Polymer Science*, 23(7): 1273-1335, (1998).
- [15] Kafle A., Luis E., Silwal R., Pan H. M., Shrestha P. L., Bastola A. K., “3D/4D Printing of polymers: Fused deposition modelling (FDM), selective laser sintering (SLS), and stereolithography (SLA)”, *Polymers*, 13(18): 1-37, (2021).
- [16] Vroman I., & Tighzert L., “Biodegradable polymers”, *Materials*, 2(2): 307-344, (2009).
- [17] https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=bb68wb0R_EAC&oi=fnd&pg=PA1&ots=TD4I6xIIKO&sig=QoStvh-gi10Cw6P0r6igFRMWkOw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [18] Turan M., “Seramik oksit katkılı nano sentetik hidroksiapatit kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2020).
- [19] Özkan A., Şişik N., Öztürk U., “Kompozit malzemelerin ağız, yüz, çene cerrahisinde kullanımı ve malzeme uygunluklarının belirlenmesi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1): 227-242, (2016).
- [20] <https://www.frmtr.com/biyoloji/1002705-biyomalzeme-bilimi.html>
- [21] Köse N., “Biyomalzemeler ve implantlara biyolojik yanıt”, *Türk Ortopedi ve Travmatoloji Birliği Derneği*, (2013).
- [22] Güven Ş., “Biyoyumluluk ve biyomalzemelerin seçimi”, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(3): 303-311, (2014).

- [23] Murat F., Korkmaz İ.H., Şensoy A. T., Kaymaz İ., “Functionally graded porous implants obtained by additive manufacturing”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(3): 540-553, (2019).
- [24] Manivasagam G., Dhinasekaran D., Rajamanickam A., “Biomedical implants: corrosion and its prevention-a review”, *Recent Patents on Corrosion Science*, 2: 40-54, (2010).
- [25] Yalçın B., Ergene B., “Endüstride yeni eğilim olan 3-d eklemeli imalat yöntemi ve metalürjisi”, *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3): 65-88, (2017).
- [26] Ramola M., Yadav V., Jain R., “On the adoption of additive manufacturing in healthcare: a literature review”, *Journal of Manufacturing Technology Management*, (2019).
- [27] Özer G., “Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 606-621, (2020).
- [28] Guo N., Leu M. C., “Additive manufacturing: technology, applications and research needs”, *Frontiers Of Mechanical Engineering*, 8(3): 215-243, (2013).
- [29] Aygül E., Yalçınkay, S., Şahin Y., “Biyomedikal uygulamalarda kullanılan Co-Cr-W ve Co-Cr-Mo metal alaşımlarının eklemeli imalat yöntemi ile üretilmesi”, *Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar*, 30-41, (2019).
- [30] Top N., Gökçe H., “Doku mühendisliğinde bilgisayar destekli yapay kemik iskelesi tasarımı”, Ed: İsmail Şahin, *İksad Yayınevi*, Ankara, (2020).
- [31] Koç E., Yılmaz F., “Biyomedikal Parçaların Eklemeli İmalatla (3D Baskı) Üretimi”, *UBİCTÜS*, (2016).
- [32] Ma H., Feng C., Chang J., Wu C., “3D-printed bioceramic scaffolds: From bone tissue engineering to tumor therapy”, *Acta Biomaterialia*, 79: 37-59, (2018).
- [33] Brie J., Chartier T., Chaput C., Delage C., Pradeau B., Caire F., Moreau J. J., “A new custom made bioceramic implant for the repair of large and complex craniofacial bone defects”, *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 41(5): 403-407, (2013).
- [34] Jiao Z., Luo B., Xiang S., Ma H., Yu Y., Yang W., “3D printing of HA/PCL composite tissue engineering scaffolds”, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2(4): 196-202, (2019).
- [35] Gibbs D. M., Vaezi M., Yang S., Oreffo R. O., “Hope versus hype: what can additive manufacturing realistically offer trauma and orthopedic surgery?”, *Regenerative Medicine*, 9(4): 535-549, (2014).
- [36] Cabrera M. S., Sanders B., Goor O. J., Driessen-Mol A., Oomens C. W., Baaijens F. P., “Computationally designed 3D printed self-expandable polymer stents with biodegradation capacity for minimally invasive heart valve implantation: A proof-of-concept study”, *3D printing and Additive Manufacturing*, 4(1): 19-29, (2017).
- [37] <https://gfxspeak.com/2017/04/04/wohlers-printing-industry/>
- [38] Szymczyk-Ziółkowska P., Łabowska M. B., Detyna J., Michalak I., Gruber P., “A review of fabrication polymer scaffolds for biomedical applications using additive manufacturing techniques”, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 40(2): 624-638, (2020).

- [39] Hutmacher D. W., Schantz T., Zein I., Ng K. W., Teoh S. H., Tan K. C., “Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling”, *Journal of Biomedical Materials Research: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 55(2): 203-216, (2001).
- [40] Geven M. A., Varjas V., Kamer L., Wang X., Peng J., Eglin D., Grijpma D. W., “Fabrication of patient specific composite orbital floor implants by stereolithography”, *Polymers For Advanced Technologies*, 26(12): 1433-1438, (2015).
- [41] Özsoy K., Kayacan M. C., “Ergiyik biriktirme yöntemiyle hafifletilmiş kişiye özel kafatası implantın hızlı prototiplenmesi”, *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 1(1): 1-11, (2018).

Modeling the Physical Effects of the LPG Tanker Accident That Occurred in Diyarbakır Lice

Ahmet DURMUŞ¹  Saliha ÇETİNYOKUŞ^{2,*} 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Environmental and Technical Investigation of Accidents, 06500, Yenimahalle/ANKARA
Ministry of Transport and Infrastructure, 06530 Çankaya/ANKARA
0000-0002-6933-9657

²Gazi University, Faculty of Engineering, Department of Chemical Engineering, 06570, Maltepe/ANKARA
salihakilicarslan@gazi.edu.tr, 0000-0001-9955-6428

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 22.07.2022
Revision: 7.11.2022
Accepted: 7.11.2022

Highlights

- LPG Tanker Accident
- Threat zones.
- Comparison of e testimonies of the eyewitnesses of the accident with the modeling results.

Keywords

LPG
BLEVE
Accident impact modeling
Correlation
ALOHA Software

In this study, it was aimed to model the physical effects of the tanker accident that took place in Diyarbakır Lice on 21/07/2014. Physical impact areas were obtained as a result of the modeling study.

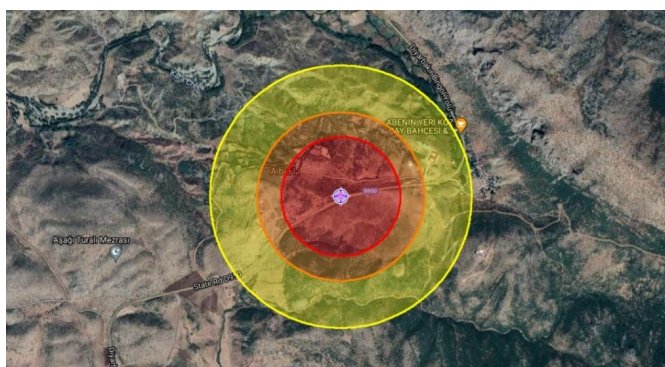


Figure A. MARPLOT display of BLEVE threat zones.

Purpose: The LPG tanker accident and its consequences, which occurred on the 90th km of Diyarbakır-Bingöl Highway, were examined.

Theory and Methods: It was stated that there were different amounts and volumes of LPG in the tanker at the time of the accident. The accident was modeled by using ALOHA Software and correlations for the winter conditions as well as the summer conditions where the accident occurred, over the mass amounts specified in different sources. The results obtained were compared with the evaluations stated in eyewitnesses and accident reports.

Results: It was observed that the BLEVE impact distances increased in winter conditions, and the impact distances of jet fire and vapor cloud flammable area decreased. It has been determined that the type and amount of the hazardous substance involved in the accident and atmospheric conditions directly affect the consequences of the accident. Since they are based on the same model equivalence, the results obtained with the correlations were found to be compatible with the software results. Additional parameters such as pressure effects and escape time could also be determined by correlation. It was shown by software and correlations that the lethal effects of the accident were caused by thermal radiation.

Conclusion: Modeling the physical effects of hazardous events such as fire, explosion and toxic emission will contribute to the prevention/reduction of other possible accidents and will also help to reduce/prevent the damage to people and the environment. In addition, the safety of the response teams will be ensured by determining the distances that can be safely intervened in the accidents. Considering the listed elements, it can be said that accident impact models will provide important inputs to emergency planning.



Modeling the Physical Effects of the LPG Tanker Accident That Occurred in Diyarbakır Lice

Ahmet DURMUŞ¹ Saliha ÇETİNYOKUŞ^{2,*}

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 06530, Çankaya, ANKARA

0000-0002-6933-9657

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe/ANKARA

salihakilicarslan@gazi.edu.tr, 0000-0001-9955-6428

Abstract

In this study, it was aimed to model the physical effects of the tanker accident that took place in Diyarbakır Lice on 21/07/2014. In the accident, the LPG-laden tanker overturned at the 90th kilometer of the Diyarbakır-Bingöl highway, 34 people lost their lives and 36 people were injured. The modeling of the accident was carried out using ALOHA Software and correlations both in the summer conditions of the accident and in the selected winter conditions. The testimonies of eyewitnesses of the accident and the distances specified in the accident reports were compared with the modeling results. All physical impact areas obtained as a result of the modeling study were moved to MARPLOT, and the structures and population that were/may be affected by the accident were revealed. It was determined that the modeling results and the accident results in the testimonies of eyewitnesses were compatible with the BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion). It was shown that the type and amount of the dangerous substance involved in the accident and atmospheric conditions directly affected the consequences of the accident. It is thought that all driving and traffic rules should be obeyed at the highest level during the passage of dangerous goods through residential areas in road transport, and if possible, the route should be created outside the dense populated areas.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22.07.2022
Düzeltilme: 7.11.2022
Kabul: 7.11.2022

Keywords

LPG
BLEVE
Accident impact modeling
Correlation
ALOHA Software

Anahtar Kelimeler

LPG
BLEVE
Kaza etki modellenmesi
Korelasyon
ALOHA yazılımı

Diyarbakır Lice'de Meydana Gelen LPG Tankeri Kazasının Fiziksel Etkilerinin Modellenmesi

Öz

Bu çalışmada, 21/07/2014 tarihinde Diyarbakır Lice' de gerçekleşen tanker kazasının fiziksel etkilerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Kazada LPG(sıvılaştırılmış petrol gazı) yüklü tanker, Diyarbakır-Bingöl karayolunun 90'ncü kilometresinde devrilmiş, 34 kişi hayatını kaybetmiş ve 36 kişi yaralanmıştır. Kazanın modellenmesi, hem kazanın olduğu yaz mevsimi koşullarında hem de örnek seçilen kış mevsimi koşullarında ALOHA (Aerial Locations of Hazards Atmosphere) yazılımı ve korelasyonlar kullanılarak yapılmıştır. Kaza görgü tanıklarının ifadeleri ve kaza raporlarında belirtilen mesafeler ile modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışması sonucu elde edilen tüm fiziksel etki alanları, MARPLOT üzerine taşınarak kazadan etkilenen/etkilenebilecek yapılar, nüfus ortaya konulmuştur. Modelleme sonuçları ile görgü tanıklarının ifadelerindeki kaza sonuçlarının BLEVE(Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması) ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Kazaya karışan tehlikeli maddenin cinsi ve miktarı ile atmosferik koşulların kaza sonuçlarına doğrudan etkisi gösterilmiştir. Tehlikeli maddelerin karayolu taşımacılığında yerleşim yerleri içerisinde geçişler esnasında tüm sürüş ve trafik kurallarına azami derecede riayet edilmesi, mümkün ise güzergâhın nüfus yoğun yerleşim yerleri dışında oluşturulması gerektiği düşünülmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal gaz, petrol gazı vb. yakıtlar enerji üretimi ve ısıtma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1-3]. Bu yakıt gazları, depolama kapasitesini büyütme ve nakliye maliyetini azaltmak için depolama ve

taşımadan önce sıvılaştırılmaktadır [1]. LPG, motor gücü, yakıt verimliliği, düşük emisyon, nispeten düşük maliyet yönleri ile karayolu taşımacılığı-yakıt pazarında dünya çapında büyük bir role sahiptir [3]. Çok miktarda LPG, çeşitli ulaşım araçlarıyla (demiryolu, karayolu, gemi vb.) düzenli olarak taşınmaktadır [4, 5]. Çoğu zaman da LPG, nüfus yoğun yerleşim alanlarından taşınır ve bu nedenle ölümcül etkiler içeren potansiyel kaza riskine sahiptir [4].

Karayolu taşımacılığında LPG tankerlerinin dahil olduğu trafik kazaları, LPG sızıntısına neden olmakta devamında yangın, patlama gibi yüksek enerji salınımları ile toksik yayılım oluşturmaktadır [3]. Bu kazalar, kaza yerinde ve çevresinde can, mal, çevre kayıpları ile domino etkileri meydana getirebilmektedir [3, 6, 7]. Elverişsiz yol koşulları, sürücülerin yasa dışı çalışması, araç koşulları veya çevresel faktörler, farklı araçlar arasında, araçlar ve yayalar arasında veya araçlar ile sabit nesnelere arasında trafik kazalarına neden olmaktadır. LPG tanker kazası sadece trafik kazasından kaynaklanmayıp, LPG tankerinin bulunduğu römorkun arızası, tank arızası, valf ve diğer parçaların hasar görmesi vb. ile doğrudan da meydana gelebilmektedir [3, 6, 7].

Bir basınçlı kaptan ortama sıvılaştırılmış gazın ani salınımı, genellikle BLEVE' ye yol açan karmaşık bir olayın başlangıcıdır [2-7]. BLEVE, basınç altında aşırı ısınmış büyük miktarda sıvı kütlesinin atmosfere ani salınımına dayanan bir patlama türüdür [1, 3, 7]. Serbest kalan malzeme yanabilir ise BLEVE, ateş topu oluşumuna neden olur. Ateş topları, maddi hasarlara, yaralanmalara veya ölüme neden olan büyük miktarda termal radyasyon oluşturur [3, 4].

LPG tehlikeli kimyasalının dahil olduğu karayolu taşımacılığı kazaları dikkat çekmektedir. Bariha ve arkadaşları (2016) tarafından 27 Ağustos 2012'de Hindistan'ın Kerala eyaletine bağlı Chala köyünde 23.30' da LPG taşıyan bir aracın neden olduğu kaza incelenmiştir. Kazada LPG, BLEVE' ye neden olmuştur. PHAST ve ALOHA yazılımları ile kaza verileri üzerinden yapılan modelleme sonuçları gerçek hasar verileriyle ilişkilendirilmiştir. Ateş topu ve jet yangını termal radyasyonu, nokta kaynak ve katı alev modeli üzerinden belirlenmiş; katı alev modelinin daha iyi sonuçlar sağladığı gösterilmiştir. TNT eşdeğerlik yöntemi üzerinden jet yangını, ateş topu radyasyonu ile BLEVE' de oluşan patlama aşırı basıncı hesaplanmış, jet yangının daha düşük etkiler verdiği görülmüştür. Yaklaşık 200 m yarıçaplı bir alanın ölümcül etkiler oluşturduğu ve hesaplanan kayıpların, gerçek can ve mal kaybı ile uyumlu olduğu belirtilmiştir [2]. Mishra (2016) tarafından, 13 Temmuz 2013' te Moskova'da bir otoyolda 36 adet propan tüpü taşıyan bir kamyonun önündeki bir minibüsle çarpıştığı kaza analiz edilmiştir. Kazada dökülen dizel yakıtının oluşturduğu havuz yangınına (çap ~10 m) propan tüplerinin girmesi, birden fazla BLEVE ve ateş topu oluşturmuştur. Tek BLEVE ve ateş topu için geçerli olan yarı deneysel modellerin, birden fazla BLEVE için uygulanabilirliği doğrulanmış ve bu tür senaryolara ilişkin ilave öneriler getirilmiştir [5]. Hemmatian ve arkadaşları (2015) tarafından taşıma, depolama, proses tesisleri ve nakil esnasında meydana gelen 202 BLEVE kazası incelenmiştir. Kazanın olduğu faaliyet türleri, neden olan etkenler, en sık rastlanan maddeler, zaman aralıkları ve nerede görüldükleri analiz edilmiştir. LPG'nin (%59) bu kazalarda en sık rastlanan madde olduğu, su (%11) ile LNG'nin (%4) de BLEVE' ye neden olduğu belirtilmiştir. Söz konusu kazaların en çok darbe (%44,8) ve insan kaynaklı hata (%30,3) nedenleri ile meydana geldiği gösterilmiştir [6]. Hemmatian ve arkadaşları (2019) tarafından yürütülen başka bir çalışmada ise 330 kaza analiz edilerek domino etkisi araştırılmış ve çeşitli kriterlere göre domino etkisi içeren 167 kaza incelenmiştir. 40 kazada BLEVE' nin tek olay olduğu, domino etkisi içeren 127 BLEVE kazası tespit edilmiştir [7]. Domino etkisini tetikleyen ilk olayın patlama veya yangın olduğu, BLEVE kazalarının 1 dakikadan az ve 1 saatten fazla sürebileceği görülmüştür. Domino etkisi olan BLEVE kazalarının en çok taşımacılık faaliyetleri esnasında meydana geldiği tespit edilmiştir [7]. Planas ve arkadaşları (2015) tarafından Puerto Lumbreras'ı Granada'ya bağlayan A-91 otoyolunun batıya giden şeridinin 3,5 kilometresinde LNG taşıyan bir tanker meydana getirdiği kaza incelenmiştir. Kazada BLEVE, hem acil durum yönetimi hem de patlama ve ateş topu etkileri açısından analiz edilmiştir. Kaza, yol kenarında duran bir araca LNG tankerinin arkadan çarpması sonucu meydana gelmiş ve kaza noktasından kuzeye doğru 90 m uzaklıkta bulunan bir ev, yolun karşı tarafında 125 m uzakta benzin istasyonu bulunan bir servis alanı etkilenmiştir [8].

Bu çalışmada, 21/07/2014 gününü 22/07/2014 gününe bağlayan gece Diyarbakır İli Lice İlçesine bağlı Ergin Mahallesi sınırları içerisinde Diyarbakır-Bingöl Karayolu 90. km`sinde meydana gelen LPG tankeri kazası ve sonuçları incelenmiştir. Kaza esnasında tanker içerisinde farklı miktarlarda 19 ton [9], 22 ton [10] LPG bulunduğu, kimyasal hacminin ise 45 m³ [11, 10], 46 m³ [9] olduğu belirtilmiştir. Bu kaza, farklı

kaynaklarda belirtilen kütle miktarları üzerinden kazanın olduğu yaz mevsimi koşulları yanı sıra kış mevsimi koşulları durumlar için ALOHA yazılımı ve korelasyonlar kullanılarak modellenmiştir. Elde edilen sonuçlar görgü tanıkları ve kaza raporlarında belirtilen değerlendirmeler [9-11] ile karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Kazanın Analizi (Analysis of the Accident)

İlgili kazaya ait farklı kaynaklarda değerlendirmeler yapılmış, kazaya dahil olan olayın BLEVE ya da UVCE (Sınırlandırılmayana Buhar Bulutu Patlaması) olabileceği üzerinde durulmuştur. “Diyarbakır İli Ergin Mahallesi sınırları içerisinde Diyarbakır-Bingöl Karayolu 90. km`sinde kaza meydana gelmiştir. Bingöl istikametinden gelen LPG tankeri şoförü direksiyon hâkimiyetini kaybetmiş, 45 m³’lük dorse kısmı kamyonun kafa kısmından ayrılmış ve yan yatarak yaklaşık 40-50 metre sürüklenmiştir. Bu esnada tankerin üst tarafında bulunan emniyet ventili yerinden çıkmış ve LPG bu bağlantı yerinden dışarıya gaz olarak salınmıştır. Ani genişleme ve yayılma özelliği (üzerindeki basıncın kalkması sonucunda hacminin 250 kat artabilme özelliği) nedeniyle çok kısa zamanda (yaklaşık 10-15 dakika içinde) çevreye LPG yayılmıştır. Yoğunluğu havadan ağır olan LPG, yerden sürünerek çukur yerlere doğru yayılmış, bu şekilde yaklaşık 500-600 metre yokuştan aşağıya (mahallenin yerleşim yerine 500-600 metre uzaklığa kadar) doğru akmıştır. Sızan gazın bulunduğu bu alana iki otobüs ve bir aracın Diyarbakır istikametinden gelerek girdiği, her üç aracın gazın yoğun bulunduğu alanda, tam olarak bilinmeyen bir nedenden(camı açık araçlardan birinin içerisinde sigara içiliyor olması, yeni bir sigara yakma girişimi, egzozdan veya yola sürtünme vb.) dolaylı bir patlamayla yangın başladığı belirtilmiştir” [8].

Başka bir kaynakta, 19 ton LPG yüklü olduğu belirtilen tankerin gece saat 24.00 sıralarında devrilmesi sonucu kaza meydana geldiği ifade edilmiştir. “LPG tankinin bağlı olduğu dorseden kopması sonucu sağ tarafa devrilerek darbe aldığı, tank üzerindeki deformasyondan gözlenmiştir. 2007 imal yılı, 46 m³ kapasiteli LPG tankında yapılan incelemede; tankta herhangi bir çatlama, yarıma vb. olmadığı tespit edilmiştir. Ancak tankta sızıntının; LPG tankinin devrilmesi ile tank üzerinde bulunan iki emniyet ventilinden birinin bağlantı noktasından kırılması sonucu oluştuğu belirtilmiştir. Tank üzerinde yapılan incelemede LPG tank emniyet ventili muhafazasının ventil yüksekliğinin altında kaldığı, olması gereken yükseklikte olmadığı tespit edilmiş, bu durumun tank imalatlarında veya sonraki yapılan tank kontrollerinde ventil ve muhafazası yüksekliğinin dikkate alınmadığı kanaatine varılmıştır. Bu kazada LPG tankına bir şey olmadığı, tank patlaması olması halinde facianın daha da büyüyebileceği, meydana gelen olayın UVCE olduğu rapor edilmiştir” [11].

Bir başka kaynakta ise BLEVE patlaması sonucu altmış dokuz kişinin alevlerle çevrildiği ve olaydan sonraki 3 ay içinde 34’ünün öldüğü belirtilmiştir [12].

Kullanılmaz hale gelen yolcu otobüsünden yara almadan kurtulan M. G. “Olay yerine yaklaşık 300 metre mesafede bulunan otobüste seyahat ettim. Patlamadan önce otobüsün içinde yoğun gaz kokusu aldım ve önümüzde seyreden başka bir yolcu otobüsü gördüm. İçeride yoğun bir gaz kokusu oluştu. Aracı durduran şoför kapıları açarak yolcuları tahliye etti. Otobüsten inerek korku içinde geriye doğru koşmaya başladığımız sırada şiddetli bir patlama sesi duyduk. Hemen ardından üzerimizden bir alev topu geçti. ” ifadelerini kullanmıştır [10].

Görgü tanığı H. D. “Patlamayı, olayın yaşandığı bölgeden 15 kilometre uzaklıkta deprem etkisi şeklinde hissettim, köylülerden önce olay yerine ilk ben yetiştim. 4 aracın yandığını gördüm. Yaralıların hepsi yandıkları için çıplak haldeydi. Bazı yaralılar olası bir patlamanın endişesiyle çıplak halde dağa kaçıyorlardı. Her yerden telefon sesleri geliyordu. Korkunç bir durum söz konusuydu. Olay yeri adeta cehennem gibiydi. Tanker şoförünün sızıntıyı fark edince karşı yönden gelen araçları uyardığını, otobüsteki yolcuların araçtan inmeye başladığı sırada patlamanın yaşandığını” ifade etmiştir [10].

Diyarbakır Büyükşehir Belediye Başkanlığı İtfaiye Daire Başkanı İ. H. Bilici, “Sıkışan gazın patlaması sonucu yaklaşık 1 kilometrelik alan tamamen alev topuna döndü, ilk ekiplerimiz 12 dakika sonra olay yerine ulaştı.” ifadelerini kullanmıştır [10].

Bilirkişi raporunda;

1. “Diyarbakır-Bingöl karayolunun 70 ila 100’üncü kilometresi arasındaki bölümün kusurlu olması bu yolda seyir halindeki araçların karşı yönden gelen araçlar için tehlike oluşturduğunu,
2. Kazaya neden olan tanker sürücüsünün ise 30 kilometre hız ile gitmesi gerekirken yaklaşık 60 kilometre hız yaptığını,
3. İki otobüs firması şoförünün LPG sisini görmelerine rağmen kendilerini ve yolcuların canını ve malını tehlikeye attıklarını,
4. Diyarbakır-Bingöl karayolunun güvenlik ve teknik anlamda tehlikeli ve yanıcı maddelerin taşınması konularında yetersiz olmasına rağmen, sürücüleri seyahat ettirdiği; terör olayları nedeniyle yolda hasarlar olduğu bilincine rağmen sürücünün bu yolda gitmeye ısrarcı olduğu; emir ve talimat verdiği gerekçesiyle tankerin bağlı olduğu lojistik uluslararası firmanın da kusurlu görüldüğü,”

belirtilmiştir [10].

2.2. LPG’nin Teknik Özellikleri ve LPG Yangınları (Technical Specifications of LPG and LPG Fires)

LPG, doğal gaz ve petrolün çıkarılması sırasında veya petrolün rafinasyonu sırasında bir yan ürün olarak elde edilmektedir. LPG’yi oluşturan temel bileşenler, propan ve bütan, kimyasal olarak oldukça benzerdir. Propan ve bütanın özellikleri arasındaki farklılıklar, LPG’nin farklı kullanım alanlarına ya da koşullarına uyumunda kolaylık sağlamaktadır. Propan, düşük kaynama noktası nedeniyle, dış mekânda depolamaya uygundur ve öncelikle merkezi ısıtma olmak üzere çok sayıda ticari uygulamada kullanılmaktadır. Bütan ise özellikle evsel ısıtıcılar ve taşınabilir ekipmanlar için uygundur [13, 14].

Propan(C₃H₈), doymuş bir hidrokarbondur. Isıl değeri 46 MJ.kg⁻¹’dir. Bütan(C₄H₁₀) önemli derecede yanıcı, sıvılaştırılabilir bir gazdır ve ısıl değeri 45 MJ.kg⁻¹’dir [14]. Sıvılaştırılmış gazlar, buhar basınç eğrisinin altında gaz fazında, üzerinde sıvı fazındadır. Yaygın kullanılan LPG karışımının (%30 propan+ % 70 bütan) mutlak doyma basıncı 10°C-30°C’ de 3,0 ila 5,8 bar arasında değişim gösterir. Atmosferik basınçta (101,3 kPa), n-bütan= -0,5°C, i-bütan= -11,70 °C, propan= -42,1°C ’de buharlaşır [15].

LPG, hava ile belli oranlarda karıştığında yanıcı ve parlayıcıdır. LPG, yanıcı gaz özelliğine sahip olduğu için statik elektrik veya alev, sıcak cisimler gibi ısı kaynakları aracılığıyla tutuşabilmektedir [15]. LPG’nin yanma bölgesi % 1,9 ila % 9 arasındadır [2, 15]. Önemli miktarda yanıcı gaz veya hava ile karışmış buhar içeren kimyasal patlamalar VCE (Buhar Bulutu Patlamaları) olarak tanımlanmaktadır. Genellikle yanıcı sıvıların veya buhar-sıvı karışımlarının salınımı ile ilişkilidirler. Bir buhar bulutu patlamasına her zaman bir ani yangın eşlik eder ve mekanik etkilerin (patlama) şiddeti, ilgili kütle ve ortamın özellikleri (kapalılık/tıkanıklık) tarafından belirlenir [13]. Basıncı bir gaz veya aşırı ısıtılmış bir sıvı (atmosferik basınçtaki kaynama noktasından önemli ölçüde daha yüksek bir sıcaklıktaki bir sıvı) içeren bir kabın buharı ile dengede ani arızalanmasından kaynaklanan fiziksel patlamalar ise BLEVE olarak adlandırılmaktadır [7, 16]. Bir delik, bir flanş vb. den belirli bir hızda salınan yanıcı gaz veya buhardan oluşan türbülanslı bir jetin hemen ateşlenmesinden kaynaklanan difüzyon alevleri, jet yangını oluşturur. Aleve, akıştaki türbülans nedeniyle çok daha fazla hava girer [13]. Termal radyasyon, bir jet yangını ile ilişkili birincil tehlikedir. Duman, yangından kaynaklanan zehirli yan ürünler ve çevredeki ikincil yangınlar ve patlamalar da diğer tehlikeleri oluştururlar [16].

2.3. LPG’nin Taşınması (LPG Transport)

Ülkemizde karayolu ile LPG ve diğer tehlikeli maddelerin taşınması:

- i. 4925 Sayılı Karayolu Taşıma Kanunu [17]
- ii. 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu [18]
- iii. Karayolu Taşıma Yönetmeliği [19]

- iv. Karayolları Trafik Yönetmeliği [20]
 - v. Karayolu Taşımacılık Faaliyetleri Mesleki Yeterlilik Eğitimi Yönetmeliği [21]
 - vi. Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik [22]
 - vii. Tehlikeli Madde Taşıyan Araç ve Üst Yapıların Teknik Muayeneleri Hakkında Yönetmelik [23]
- hükümlerine uygun olarak yapılmak zorundadır.

A. 4925 sayılı Karayolu Taşıma Kanunu'nun 5 inci maddesinin;

- 1 inci fıkrası; "Taşımacılık, acentelik ve taşıma işleri komisyonculuğu ile nakliyat ambarı ve kargo işletmeciliği yapılabilmesi için Bakanlıktan yetki belgesi alınması zorunludur." hükmüne,
- 2 nci fıkrası; "...Ayrıca, karayoluyla yük ve yolcu taşımacılığı faaliyetlerinde kullanılan ticari araçlarda çalışan şoförlerin, sürücü mesleki yeterlilik belgesi almaları zorunludur..." hükmüne,
- 3 üncü fıkrası; "Taşımacılara, yetki belgesinden ayrı olarak taşımalarda kullanılacak taşıtların niteliğini ve sayısını gösteren taşıt belgesi ile taşımacının taşıt belgesinde kayıtlı her taşıt için düzenlenen ve taşıtta bulunması gereken taşıt kartı verilir." hükmüne
- 5 inci fıkrası; "Tehlikeli yük taşıyan taşıtlar ve bunların bağlı olduğu taşımacılar, taşıyacakları yüklerin özelliğine uygun olduğunu gösteren bilgi ve belgelere dayanarak birinci fıkrada belirtilen yetki belgesinden ayrı olarak ilgili mercilerden ayrıca izin almakla yükümlüdürler." hükmüne,

B. 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu'nun

- 34 üncü maddesinin 1 inci fıkrası; "Trafığe çıkarılacak motorlu araçların teknik şartlara uyup uymadığı ekonomik yapıları da, dikkate alınmak suretiyle belirli zamanlarda muayene edilerek tespit edilir." hükmüne,
- 65 inci maddesinin 1 inci fıkrası;
 - "b) Azami yüklü ağırlığın veya izin verilen azami yüklü ağırlığın aşılması,
 - c) (b) bendindeki ağırlıklar aşılmamış olsa bile azami dingil ağırlıkları aşılacak şekilde yüklenmesi,
 - d) Karayolu yapısı ve kapasitesi ile trafik güvenliği bakımından tehlikeli olabilecek tarzda yükleme yapılması,
 - e) Tehlikeli ve zararlı maddelerin gerekli izin ve tedbirler alınmadan taşınması, yasaktır.",
 - 91 inci maddesinin 1 inci fıkrası; "İşletenlerin, bu Kanunun 85 inci maddesinin birinci fıkrasına göre olan sorumluluklarının karşılanmasını sağlamak üzere mali sorumluluk sigortası yaptırmaları zorunludur." hükmüne,

amirdir.

Buna göre;

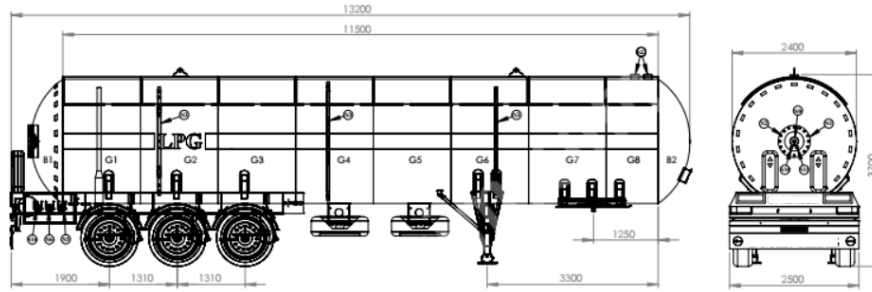
- "LPG taşıyacakların Karayolu Taşıma Yönetmeliğinin 6 ncı maddesi uyarınca "C", "K", ve "L" türü yetki belgesi alması ve yetki belgesi sahiplerinin faaliyetlerinde kullanacağı taşıtlar, yetki belgesi eki taşıt belgesine kaydedilmesi,
- Karayolu Taşımacılık Faaliyetleri Mesleki Yeterlilik Eğitimi Yönetmeliği'nin 6 ncı maddesi uyarınca sürücülerin SRC5 türü mesleki yeterlilik belgesi alması,
- Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik'in 5 inci maddesi uyarınca taşımacı, dolduran, paketleyen, yükleyen, gönderen, boşaltan, alıcı ve tank-konteyner/portatif tank işletmecilerinin, "Tehlikeli Madde Faaliyet Belgesi" almaları,
- Karayolları Trafik Yönetmeliğinin
 - 98. maddesinde belirlenen Araç Kullanma ve Dinlenme Sürelerine Uyuma Mecburiyeti ve Denetleme Esasları'na göre sürücülerin çalışması,
 - 128 inci maddesinde belirtilen şekilde araçlara yükleme yapılması,
- Araç Muayene İstasyonlarının Açılması, İşletilmesi ve Araç Muayenesi Hakkında Yönetmelik'in 14 üncü maddesi uyarınca araçların her yıl muayeneye tabi tutulması,
- Tehlikeli Madde Taşıyan Araç ve Üst Yapıların Teknik Muayeneleri Hakkında Yönetmelik' 13 üncü maddesi uyarınca araçların her yıl muayeneye tabi tutulması,"

zorunludur.

LPG'nin de içerisinde bulunduğu yanıcı gazlar ve diğer tehlikeli maddelerin taşınması yukarıda anılan Kanun ve Yönetmeliklerin ilgili diğer maddelerine, Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik ve Tehlikeli Madde Taşıyan Araç ve Üst Yapıların Teknik Muayeneleri Hakkında Yönetmelik'in diğer hükümlerine ve Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Anlaşması (ADR) hükümlerine de uygun olmak zorundadır.

2.4. LPG Tankeri Özellikleri (LPG Tanker Characteristics)

İşletme basıncı, dökme taşıma araçları üzerindeki LPG tankları için, 1716 kPa (17,5 kgf/cm²)' dir. [10]. Tankların gövde ve kapaklarının imalatında kullanılan çelik sacların kalınlığı tank dış çapının 1/200' ünden az olmamalıdır. Mukavemet hesapları daha ince et kalınlığına müsaade etse de, sac kalınlığı 9 mm'den az olmamalıdır. Bu sacların MPa cinsinden çekme mukavemeti ile kopma uzama yüzdesinin çarpımı en az 102 olmalıdır [15]. Şekil 1'de örnek bir tankerin boyutları gösterilmekte olup; tankerin hacmi 55 m³ ve emniyet valfi çapı 2" (58mm)' dir.



Şekil 1. Örnek bir silindirik LPG tankının boyuna ve enine kesiti ile boyutları [15]

2.5. Kaza Etki Modelleme Çalışmaları (Accident Impact Modeling Studies)

Söz konusu kazanın muhtemel fiziksel etkileri ALOHA yazılımı ve korelasyonlar üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Yazılım ile kaza etki modellemesi

ALOHA yazılımı, kimyasal acil durumlara müdahalede ve acil durumların planlanmasında kullanılan tehlike modelleme programıdır. Gerçek veya potansiyel kazalar hakkında detay bilgilerin girişini sağlayarak farklı tehlikeler için tehlike bölgeleri belirlenmektedir. Kırmızı tehlike bölgesi en kötü tehlike seviyesini, turuncu ve sarı sırasıyla azalan tehlike seviyelerini temsil etmektedir [24].

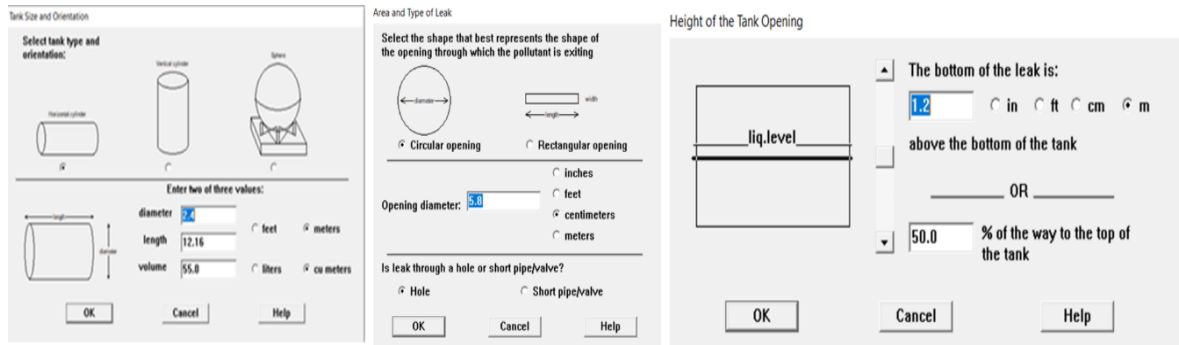
Bir BLEVE' de hem yanıcı hem de yanıcı olmayan sıvılaştırılmış gazlar bulunabilmesine rağmen, yazılım yalnızca yanıcı özellikteki BLEVE' leri modellemektedir. Yaygın bir BLEVE senaryosu, sıvılaştırılmış gazdan oluşan bir konteynerin ateşle ısıtıldığında meydana gelir ve tank parçalanıp bozulana kadar konteyner içindeki basıncı artırır. Kap bozulduğunda, kimyasal, bir patlamayla açığa çıkar. Kap bozulduğunda kimyasal kaynama noktasının üzerindeyse, sıvının bir kısmı veya tamamı ani kaynar, yani anında gaz haline gelir. Kimyasal yanıcı ise, kimyasalın önemli bir miktarı ani kaynadığında ateş topu adı verilen yanan bir bulut oluşturur. Yazılım, ateş topunda tüketilmeyen herhangi bir sıvının havuz yangını oluşturacağını var sayar. Potansiyel BLEVE tehlikeleri arasında, termal radyasyon, ani basınç, tehlikeli parçalar, duman ve yangından kaynaklanan toksik yan ürünler bulunur [16].

Jet yangınları, bir borudan veya tanktan yanıcı bir gaz sızdığına meydana gelir. Bu tür yangınlar için iki yaygın deneysel modelleme yaklaşımı vardır: yanma enerjisinin bir kısmının termal radyasyona dönüştürüldüğü ve yangının merkezinden yayıldığı nokta kaynaklı modeller ile yangının boyutunun ve şeklinin olduğu katı alev modelleridir [16,24].

Parlama/ani yangınlarda üretilen termal radyasyon oldukça geçicidir. Yazılım, ani yangınla ilişkili termal radyasyonu modellemez, bunun yerine ABD EPA'nın (Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Ajansı Kimyasal Acil Durum Hazırlık ve Önleme Ofisi, 1999) bulut için alt yanıcılık veya patlayıcı sınırlı tehlike bölgesi ile ilgili yaklaşımını kullanır ve ani yangından kaynaklanan tehlike bölgesinin yakında olduğunu varsayar [16].

Kimyasal kaynak

Kaza raporları temel alınarak iki farklı LPG miktarı (19 ton ve 22ton) üzerinden çalışılmıştır. ALOHA, birçok karışımı modellemede kısıtlıdır. Bu nedenle, LPG' nin %30 propan ve %70 bütan dan oluştuğu karışım dikkate alınarak yüksek içerik bütan üzerinden modelleme yapılmıştır. Kazada tank üzerinde bulunan iki emniyet ventilinden birinin bağlantı noktasından kırıldığı ifade edilmiştir [11]. Hem ALOHA yazılımı kullanılırken hem de korelasyonlar uygulanırken emniyet valfinin tankın üst noktasında ve orta ekseninde olduğu kabul edilmiş; kaza resimlerinden tankın yan yattığı göz önünde bulundurularak kaza anında emniyet valfi yüksekliği tank yarıçapı olan 1,2m ve sızıntıya neden olan delik dairesel formda kabul edilerek modelleme yapılmıştır. Şekil 2'de tank özellikleri, sızıntı türü ve alanı ile sızıntı yüksekliği verilerinin yazılıma girişi ekran görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 2. Tank özellikleri, sızıntı türü ve alanı ile sızıntı yüksekliği verilerinin yazılıma işlendiği ekran görüntüleri

Kazanın olduğu nokta koordinatları Google Maps üzerinden 38°30'57"N, 40°33'03"E olarak tespit edilmiştir. Kazanın ağaç ve nüfus yoğunluğunun az olduğu kırsal alanda ve yaklaşık olarak 1000 m rakımda gerçekleştiği görülmüştür.

Atmosferik Koşullar

Kazanın olduğu tarihte, kaza noktasına ait meteorolojik verilerin bulunmaması nedeniyle Diyarbakır Havaalanına ait veriler üzerinden çalışılmıştır. Kazanın kış koşullarında gerçekleşmesi durumunu temsilen seçilen örnek tarih ve kazanın gerçekleştiği tarihteki atmosferik koşullar Tablo 1' de verilmiş ve bu veriler yazılıma işlenmiştir.

Tablo 1. Kazanın olduğu tarih(yaz) ve örnek seçilen tarih(kış) için atmosferik koşullar

| | Kazanın olduğu tarih (22/07/014) | Örnek seçilen tarih(08/02/2022) |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Hava sıcaklığı | 25°C | 4,4°C |
| Rüzgar hızı | 2 m/s | 4 m/s |
| Bulutluluk | Açık | Kapalı |
| Ortam pürüzlülüğü | Kırsal alan | Kırsal alan |
| Nemlilik | Orta | Orta |
| Bağıl nem oranı | 53% | 100 % |
| Rüzgâr yönü | Kuzey Doğu | Kuzey Doğu |
| Atmosferik kararlılık sınıfı | B | D |

| | | |
|------------------------------------|-----|-----|
| Etkilerin elde edileceği yükseklik | 2m | 2m |
| İnversiyon | Yok | Yok |

Senaryo Seçimi

Kazaya dair muhtemel tüm fiziksel etkiler modellenmiştir. Basıncılı yanıcı sıvı içeren bir tank senaryo edilmiş ve tanktaki arızaların türü aşağıda sıralanmıştır:

- i) Sızdıran tank, kimyasal atmosfere salınırken yanmaz.
- ii) Sızdıran tank, kimyasal jet yangını olarak yanar.
- iii) BLEVE, tank patlar ve kimyasal, ateş topu içinde yanar.

Korelasyonlar ile kaza etki modellenmesi

BLEVE kazalarında genellikle patlamaların gücü TNT eşdeğerlilik metodu yardımı (Eş. 2.1) ile hesaplanmaktadır [8]. TNT eşdeğerlik yöntemi, patlama bölgesine yakın patlama aşırı basıncının çok gerçekçi sonuçlarını vermektedir [[2]].

$$W_{TNT} = \eta \cdot \frac{M \cdot \Delta H_C}{\Delta H_{TNT}} \quad (2.1)$$

Burada, M; kütle (kg) , ΔH_C ; malzemenin alt ısıl değeri (kJ/kg), ΔH_{TNT} ; patlama enerjisi (4680 kJ/kg) ve η ise patlama verimidir.

Hidrokarbonlar buhar bulutu patlamalarına dahil olan en yaygın maddelerdir. Ancak, oldukça zayıf patlayıcıdır ve açığa çıkan enerjinin sadece küçük bir kısmı patlama dalgasını oluşturmak için kullanılır. Bu oran çeşitli kaynaklarda %1 -10 olarak önerilir, ancak %3 ($\eta=0,03$) genel kabuldür [25]. Daha sonra ölçeklendirilmiş mesafe, d_n (Eş. 2.2) belirlenerek patlamanın tepe basıncı, ΔP (Eş. 2.3) hesaplanır. (P_0 ; atmosfer basıncı (101325 Pa))

$$d_n = \frac{R}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (2.2)$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{1}{d_n} + \frac{4}{d_n^2} + \frac{12}{d_n^3} \quad (2.3)$$

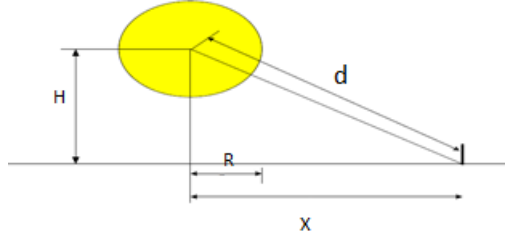
BLEVE ateş topu termal radyasyon etkilerinin belirlenmesinde katı alev modeli kullanılabilir [25]. Bu modelde, ateş topunun maksimum çapı (Eş. 2.4) ve süresi (Eş. 2.5) ile yüksekliği (Eş. 2.6) hesaplanır.

$$D = a \cdot M^b \quad (2.4)$$

$$t = c \cdot M^d \quad (2.5)$$

$$H = 0,75 \cdot D \quad (2.6)$$

Burada D , ateş topunun (m) maksimum çapı; t , ateş topunun maksimum süresi (s) ve M yakıtın kütlesi (kg)'dir. a , b , c , d ise deneysel belirlenmiş birer sabittir [4, 8, 25]. LPG için a , b , c , d sabitleri sırasıyla 6,48; 0,325; 0,825 ve 0,26 olarak kabul edilir [4]. Ateş topunun geometrik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Ateş topunun gösterimi [25]

Emisyon gücü (E) Eş. 2.7 ve radyant ısı fraksiyonu (η) Eş. 2.8 ile hesaplanır [25]. Görüş faktörü Şekil 3'ten yararlanılarak Eş. 2.9 ve Eş. 2.10, atmosferik geçirgenlik Eş. 2.11-13 ile hesaplanır.

$$E = \frac{\eta \cdot M \cdot \Delta H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t} \quad (2.7)$$

$$\eta = 0,0325 \cdot P_{sv}^{0,32} \quad (2.8)$$

(ΔH_c yanma ısısı (kJ/kg), P_{sv} , tankın içindeki basınç (Pa) ve η , radyant ısı fraksiyonu)

$$F_g = \left(\frac{R}{d}\right)^2 = \left(\frac{R}{\sqrt{H^2 + x^2}}\right)^2 \quad (2.9)$$

$$d = \sqrt{H^2 + x^2} \quad (2.10)$$

$$\tau_a = 2,02 \cdot [P_w \cdot (d - R)]^{-0,09} \quad (2.11)$$

$$P_w = H_R \cdot P_{wa} \quad (2.12)$$

$$\ln P_{wa} = 23,18986 - \frac{3816,42}{(T - 46,13)} \quad (2.13)$$

Burada P_w , atmosferdeki suyun kısmi basıncı (Nm⁻²); P_{wa} , atmosfer sıcaklığındaki doymuş su buharı basıncı(Nm⁻²); H_R , atmosferin bağıl nemidir (%). (P_{wa} , atmosferin sıcaklığından elde edilebilir). Nihayetinde termal radyasyon akısı, I(kW/m²), Eş. 2.14 ile hesaplanır.

$$I = E \cdot F_g \cdot \tau_a \quad (2.14)$$

Literatürde, ısı akısının bir fonksiyonu olarak ağırı/acı hissetmeden önce geçen süre(kaçış süresi) araştırılmıştır [26]. Deneysel olarak elde edilen veriler, cilt 0,1 mm yanık derinliğine ve 45° C sıcaklığa ulaştığında bir kişinin acı hissettiğini göstermiş ve bu aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$t_d = (35/I)^{4/3} \quad (2.15)$$

Burada t_d , acı hissedene kadar geçen süredir ve I, kW/ m² cinsinden termal akıdır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Kaza, ALOHA yazılımı ve korelasyonlar ile kazanın olduğu tarihteki ve kış mevsimini temsil eden örnek bir tarihteki atmosferik koşullara göre ilgili kütleler üzerinden ayrı ayrı modellenmiştir. Hesaplamalar yapılırken tank basıncı bilinmediğinden tankın işletme basıncı (1716 kPa) temel alınmıştır [25]. Görgü tanığının ifadesine göre 300 metre mesafedeki otobüste bulunan kişilerin etkilenmesi durumu dikkate alınmıştır [10].

3.1. Yazılım ile Kaza Etki Modellemesi (Accident Impact Modeling with Software)

ALOHA yazılımı ile LPG sızıntısı sonucu olası BLEVE, jet yangını ve buhar bulutu yanabilir alan etkileri modellenmiştir. Yazılım, BLEVE, jet yangınlarından kaynaklanan termal radyasyon tehlikelerini hesaplamak için katı alev modelini kullanır. Parlama yangınlarında ise hava dağılım modelleri kullanılır. Salımdan sonra herhangi bir zamanda gaz konsantrasyonunun LEL(Lower Explosion Limit-Alt Patlama Sınırı)'nin %60'ını aştığı herhangi bir yer, tehlike bölgesine dahil edilir[16]. Farklı madde miktarları üzerinden elde edilen fiziksel etki mesafeleri Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 2. Yazılım ile belirlenen fiziksel etki mesafeleri (19 ton LPG)

| Tehlike Bölgesi | Kazanın Olduğu Tarih (Yaz) | | | Seçilen Tarih (Kış) | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|----------------------|-------------|-----------------------------|
| | BLEVE | Jet Yangını | Buhar Bulutu Yanabilir Alan | BLEVE | Jet Yangını | Buhar Bulutu Yanabilir Alan |
| Kırmızı | 347m | 37m | 170m | 358m | 26m | 75m |
| Turuncu | 489m | 56m | - | 506m | 39m | - |
| Sarı | 763m | 89m | 415m | 789m | 61m | 214m |

Tablo 3. Yazılım ile belirlenen fiziksel etki mesafeleri (22 ton LPG)

| Tehlike Bölgesi | Kazanın Olduğu Tarih (Yaz) | | | Seçilen Tarih (Kış) | | |
|-----------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|-------------|-----------------------------|
| | BLEVE | Jet Yangını | Buhar Bulutu Yanabilir Alan | BLEVE | Jet Yangını | Buhar Bulutu Yanabilir Alan |
| Kırmızı | 363m | 37m | 170m | 375m | 27m | 78m |
| Turuncu | 513m | 56m | - | 530m | 39m | - |
| Sarı | 799m | 89m | 418m | 827m | 61m | 222m |

Tablo 2 ve 3'te BLEVE ve jet yangını kırmızı, turuncu ve sarı bölge etki mesafeleri sırası ile 10kW/m²: 60saniye içinde potansiyel ölüm; 5 kW/m²: 60 saniye içinde ikinci derece yanıklar; 2 kW/m²: 60saniye içinde acı/ağrı eşik değerlerine karşılık gelmektedir. Buhar bulutu yanabilir alan kırmızı ve sarı etki mesafeleri ise sırasıyla 9600ppm:%60 LEL alev paketçikleri, 1600ppm: %10 LEL değerlerine karşılık gelmektedir. Yanabilir alan için tanımlanan LEL hava içinde olması gereken minimum yanıcı madde buhar oranıdır [24]. Kimyasal miktarı arttıkça BLEVE etkilerinin arttığı, jet yangını ve buhar bulutu yanabilir alan etki mesafelerinde ciddi değişimlerin olmadığı görülmüştür. BLEVE için yazılım, neredeyse ani bir kopma olduğunu ve tanktaki tüm içeriğin ateş topuna katkıda bulunduğunu varsaymaktadır [16]. Kaza analizinde ateş topunun kütesine bağlı olarak, ateş topunun maksimum çapı hesaplanmıştır.

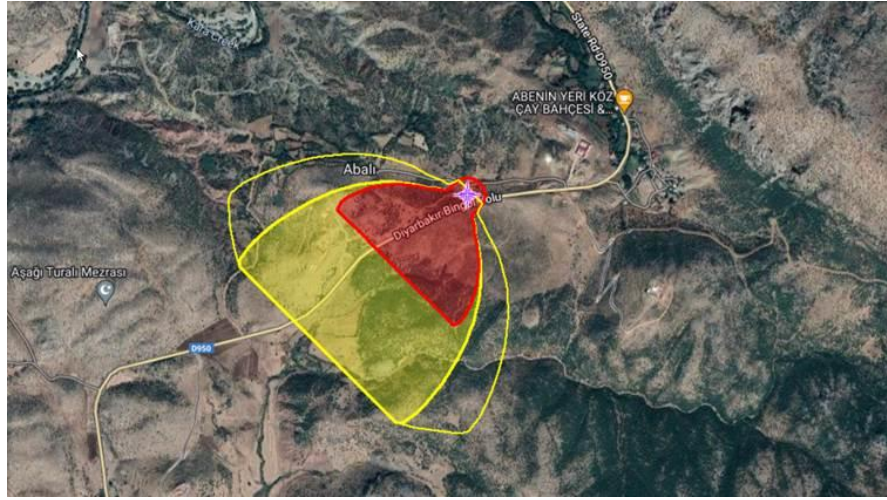
BLEVE, jet yangını ve buhar bulutuna ait elde edilen çeşitli parametreler ise Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Yazılım ile kazaya dair hesaplanan parametreler

| | | Kazanın Olduğu Tarih (Yaz) | Seçilen Tarih (Kış) | Kazanın Olduğu Tarih (Yaz) | Seçilen Tarih (Kış) |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|
| BLEVE | Kütle kaybı (kg) | 19 000 | 19 000 | 22 000 | 22 000 |
| | Ateş topu çapı (m) | 155 | 155 | 163 | 163 |
| | Yanma süresi (s) | 11 | 11 | 11 | 11 |
| JET YANGINI | Alev uzunluğu (m) | 33 | 23 | 33 | 23 |
| | Yanma hızı (kg/dk) | 1 290 | 605 | 1 290 | 614 |
| | Yanma süresi (dk) | 34 | 57 | 36 | * |
| | Toplam yanan kütle (kg) | 17 607 | 15 580 | 20 533 | 18 552 |
| BUHAR BULUTU YANABİLİR ALAN | Sızıntı hızı (kg/dk) | 1 290 | 567 | 1 290 | 613 |
| | Sızıntı süresi (dk) | 34 | 57 | 36 | * |
| | Salınan kütle (kg) | 17 607 | 15 580 | 20 533 | 18 552 |

* ALOHA Süreyi 1 saat ile sınırlandırmıştır.

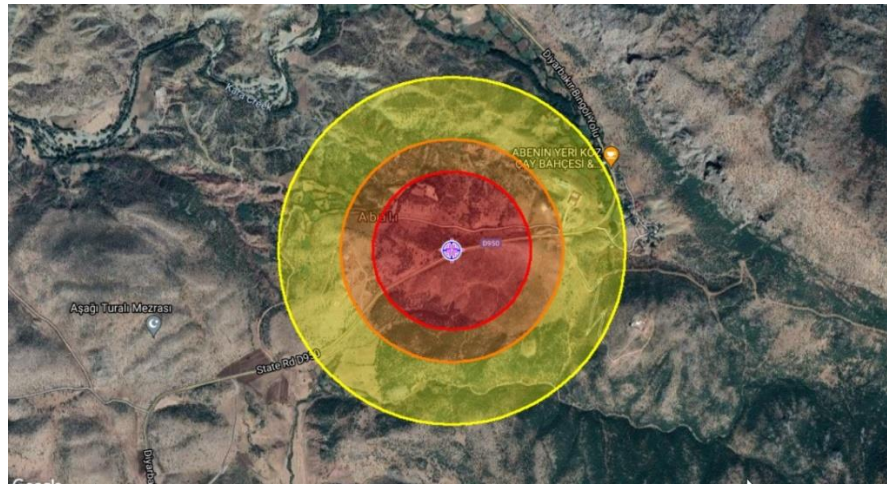
Tablo 4' ten madde miktarı arttıkça BLEVE ateş topu çapının arttığı, atmosferik koşulların ise çap değeri üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmüştür. BLEVE durumunda, patlama hemen hemen salınım noktasında meydana geldiğinden ve atmosfere dağılım önemsiz olduğundan, yaz ve kış durumunu temsilen seçilen atmosferik koşullar etki mesafelerini değiştirmemiştir [27]. BLEVE yanma süresinin atmosferik koşullar ve madde miktarı ile değişmediği belirlenmiştir. Yazılım, BLEVE için havuz yangını ve ateş topu kaynaklı termal radyasyon etkilerini belirlemektedir. BLEVE sonucu patlama ve yangın yan ürünlerinin toksik etkilerini dikkate almamaktadır [16]. Jet yangını alev uzunluğu ve yanma hızının madde miktarı ile değişmediği, ancak kış koşullarında daha az olduğu görülmüştür. Jet yangını yanma süresi ve toplam yanan kütle hem madde miktarı hem de atmosferik koşullardan etkilenmiştir. Jet yangını, belirli bir hızda salınan yanıcı bir gaz veya buharın yanmasından kaynaklanan türbülanslı difüzyon alevleridir. Jet yangınlarında, akış türbülansı nedeniyle alev büyük miktarda hava girer. Tipik olarak, bu yangınlarda havanın hacmi stokiyometrik yanma için gerekli olanın beş katına kadar çıkabilir [13, 25]. Buhar bulutu yanabilir alanı sızıntı hızı atmosferik koşullardan; sızıntı süresi ve salınan kütle atmosferik koşullar yanında madde miktarından etkilenmiştir. Buhar bulutu, salınım sonrası hemen tutuşmayan buharın ortamda dağılımı ile ilgilidir. Buharın içerdiği basınç enerjisi, kinetik enerjiye dönüştürülür. Bu esnada buharın yoğunluğu, basıncı ve sıcaklığı değişir [25]. Özellikle buhar bulutu yanabilir alanı burada potansiyel parlama yangını temsil etmektedir. Elde edilen tehlike alanlarının MARPLOT gösterimi Şekil 4' te ayrı ayrı verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. Tehlike alanlarının MARPLOT programı ile gösterimi (a) Buhar bulutu (b) Jet yangını (c) BLEVE

Şekil 4' ten BLEVE' nin, ilgili kazanın hakim sonucu olduğu bir kez daha görülmüştür. Literatürde, BLEVE kazalarının en sık karayolu taşımacılığında görüldüğü ve bu kazalara dahil olan tehlikeli kimyasalın en çok LPG olduğu belirtilmektedir [[4], 6, 7]. Söz konusu kazada aracın devrilmesi nedeni ile LPG tankının darbeye bağlı arızalanması meydana gelmiştir. Darbe etkisi ile BLEVE mekanizmasına bağlı olarak sıvılaştırılmış gaz hızla buharlaşmış basınç yükselmiş ve patlama etkisi ile vanaların olduğu tankın üst kısmı ayrılarak iki parçaya bölünmüştür ve bu patlama tankı paramparça etmemiştir. Silindirik tanklar söz konusu olduğunda, ilk çatlak genellikle aksel bir doğrultuyu izlemektedir [6, 28]. Sonuç analizleri yorumlarının nitel gözlemler yanında daha çok metrik değerlere dayandırılması önemlidir. Çünkü bu çalışmalar deterministik bir yaklaşıma dayanır. Olay yeri görgü tanıkları ifadelerinde hem nitel hem de nicel gözlemlere bir arada önem verilmelidir. BLEVE mekanizması sonucu ortama salınan buhar muhtemelen düşük enerji yoğunluğuna sahip bir kaynak (sigara vb.) ile tutuşmuş ve ateş topu meydana getirmiştir. Ateş topu BLEVE' ye bağlı gelişen bir yangın türüdür [29]. "BLEVE zamanının" kesin olarak bilinmediği, birkaç saniye ile birkaç saat arasında değişim gösterdiği çeşitli kaynaklarda belirtilmektedir [7, 25, 29]. Ortamda yeterince büyük miktarlarda buhar birikmesi ve salınan bu buharın tamamını tutuşturacak nitelikte bir enerji kaynağının ortamda bulunması ancak VCE' a yol açabilir. Gerçekleşen VCE' da yine BLEVE' nin bir başka sonucu olacaktır [25]. Görgü tanıklarının patlama sesi duyması, buhar bulutu gözlemi, ateş topu gözlemi ile 300m' lik mesafede etkilenme yorumları birlikte dikkate alındığında kazaya karışan olayın BLEVE olduğu bir kez daha söylenebilir. BLEVE' nin ateş topu ile ilişkisi, mekanik etkileri termal etkiler ile birleştiren bir kaza meydana getirmiştir.

3.2. Korelasyonlar ile Kaza Etki Modellemesi (Accident Impact Modeling with Correlations)

Kazanın yazılım ile modelleme çalışmaları, BLEVE etkilerinin baskın olduğunu ve kazanın gerçek etki mesafelerinin BLEVE fiziksel etkileri ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu nedenle BLEVE' ye yönelik ilgili korelasyonlar uygulanarak (Eş. 2.1-2.14) çeşitli parametreler hesaplanmış, Tablo 5' te sunulmuştur.

Tablo 5. Korelasyonlar ile kazaya dair hesaplanan parametreler

| Parametre | 19 ton LPG | 22 ton LPG |
|------------|---|---|
| W_{TNT} | 5602,56kg | 6487,18kg |
| d_n | 4,6149m/kg ^{1/3} | 4,6117 m/kg ^{1/3} |
| ΔP | 0,5266bar | 0,5272bar |
| D | 159,38m | 167,06m |
| t | 10,69s | 11,10s |
| H | 119,46m | 125,29m |
| E | 360,27 | 365,03 |
| F_g | 0,061 | 0,066 |
| τ_a | Kazanın olduğu tarihte:0,6557 Seçilen tarihte:0,6994 | Kazanın olduğu tarihte:0,6578 Seçilen tarihte:0,7015 |
| I | Kazanın olduğu tarihte:14,41 kW/m ² Seçilen tarihte:15,37 kW/m ² | Kazanın olduğu tarihte:15,85 kW/m ² Seçilen tarihte:16,90 kW/m ² |
| t_d | Kazanın olduğu tarihte:3,27s Seçilen tarihte:2,99s | Kazanın olduğu tarihte:2,88s Seçilen tarihte:2,64s |

*Kazanın olduğu tarihte ve seçilen tarihte sırasıyla P_w parametresi 1640,31 ve 802,954 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5' ten yazılım ve korelasyon ile elde edilen yanma süresi ve ateş topu çaplarının birbiri ile uyumlu olduğu (fark < %10) görülmüştür. Bu durum yazılım ve korelasyonların aynı modele (nokta kaynak modeli) dayandığının bir sonucudur. Korelasyonlar ile yazılımın modellemeye yetersiz kaldığı patlama basınçları da hesaplanabilmiştir. Ayrıca yaklaşık 3 saniyelik bir kaçış süresi belirlenmiştir. Madde miktarı arttıkça patlama basıncı, ateş topu yüksekliği, ateş topu çapı, ateş topu süresi ve termal radyasyon değerlerinin arttığı görülmüştür. Ateş topunun çapı, süresi ve yüksekliğinin tankerde bulunan yanıcı madde miktarı ile doğru orantılı olduğu literatürde de belirtilmektedir [4]. Kış mevsimini temsilen seçilen atmosferik koşullarda daha yüksek termal radyasyon değerleri elde edilmiştir. Elde edilen tüm termal radyasyon değerleri ölümcül eşik değerinden (8kW/m²) yüksektir. Hesaplanan yaklaşık 7,6 psia mertebesindeki basınç ortamdaki yapıların yıkılması eşiğine ulaşmadığını (>8psia) ve ölümcül etkilerin oluşmayacağını

göstermiştir [24]. Bu nedenle, kazada yaşanan can kayıplarının BLEVE termal radyasyon etkilerinden kaynaklandığı söylenebilir. Hesaplanan termal radyasyonun ($\approx 15 \text{ kW/m}^2$) yapılar üzerinde etkisi incelendiğinde ise tahta malzemeler için kritik radyasyon yoğunluğuna erişildiği ve yüzeyle temas etmeden alevle tutuşmanın gerçekleşebileceği söylenebilir [30].

Bu kaza analizi, kazanın kırsal alan yerine şehir içerisinde yer alan karayolu üzerinde gerçekleşmesi halinde daha büyük faciaların ortaya çıkacağını göstermektedir. Bu nedenle, tehlikeli maddelerin şehir içi geçişlerinin daha dikkatli ve özenli yapılmasını sağlayacak şekilde teknik çalışmalar ve mevzuat çalışmalarının yapılmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Ülkemiz tehlikeli madde taşımacılığı kazalarına yönelik spesifik verilerin temini/kaydı ve analizi ile kazaların frekanslarının bilinmesi, daha kapsamlı sonuçlar sağlayan analizlerin (QRA-Kantitatif Risk Analizi, FTA-Hata Ağacı Analizi vb.) yapılabilmesini sağlayacaktır [[6]].

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Kazaların yangın, patlama ve toksik yayılım gibi fiziksel etkilerinin modellenmesi olası diğer kazaların önlenmesi/azaltılmasına katkı sağlayacağı gibi kazaların insanlara ve çevreye vereceği zararların da azaltılmasına/önlenmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, kazalara güvenli bir şekilde müdahale edilebilecek mesafeler belirlenerek müdahale ekiplerinin de güvenliği sağlanmış olacaktır. Sıralanan unsurlar dikkate alındığında, kaza etki modellemelerinin acil durum planlamalarına önemli girdiler sağlayacağı söylenebilir.

Çalışmada, hem 22 ton LPG hem de 19 ton LPG miktarı üzerinden yazılım ile yapılan modelleme sonuçlarının görgü tanıklarının nitel ve nicel ifadelerini birlikte doğruladığı belirlenmiştir. Aynı kazanın kış mevsimini temsilen seçilen bir tarihte olması durumu her iki miktardaki LPG'ye göre yeniden yazılım ile modellenmiştir. Kış koşullarında BLEVE etki mesafelerinin arttığı, jet yangını ve buhar bulutu yanabilir alanı etki mesafelerinin azaldığı görülmüştür. Kazaya karışan tehlikeli maddenin cinsi ve miktarı ile atmosferik koşulların kaza sonuçlarına doğrudan etki ettiği belirlenmiştir. Aynı model denkliklerini temel aldıkları için korelasyonlar ile elde edilen sonuçlar yazılım sonuçları ile uyumlu bulunmuştur. Korelasyon ile basınç etkileri ve kaçış süresi gibi ilave parametreler de belirlenebilmiştir. Kazanın ölümcül etkilerinin termal radyasyon kaynaklı olduğu yazılım ve korelasyonlar ile gösterilmiştir. Kazanın BLEVE ile başlayıp sonrasında UVCE ile devam etmesinin de ihtimal olduğu söylenebilir.

İlgili kaza gerçek verileri ile yazılım, modelleme sonuçları dikkate alındığında, tehlikeli maddelerin muhtemel can ve çevre kayıplarını önlemek için karayolu taşımacılığında yerleşim yerleri içerisinde geçişler esnasında tüm sürüş ve trafik kurallarına azami derecede riayet edilmesi gerektiği söylenebilir. Nüfus yoğun alanlarda taşımacılık güzergâhının mümkün ise alternatif güzergâhlara (kırsal, az yoğun alanlar vb.) aktarılmasının önemi görülmektedir. Ayrıca bu güzergâhlarda yer alan mevcut yapılarda ve kaza etkilerini artırabilecek yeni yapı inşaatlarında ilgili etki mesafeleri göz önüne alınarak koruyucu/iyileştirici önlemlerin alınması önem arz etmektedir.

Bu çalışmaya konu olan LPG tankeri patlaması kazasının, çeşitli kaynaklarda sürücünün kontrolünü kaybetmesinin neden olduğu kabul edilmiştir. Ancak, patlamaya neden olan ateşleme kaynağının birkaç nedenden biri olabileceğine dair varsayımlar ileri sürülmüştür [11, 12]. Kazaya uğrayan araçlar (çekici ve yarı römork) hakkında, imalat bilgileri ve mevzuat hükümlerine ilişkin bilgi ile sürücünün tehlike madde taşımacılığı faaliyetlerine yönelik eğitim alıp almadığı ve çalışma sürelerine dair herhangi bir bilgi tespit edilmemiştir [11-13]. Bu tür tehlikeli madde taşımacılığı kazalarının önlenmesine yönelik olarak sürücünün taşınan tehlikeli maddeler konusunda yeterli eğitimi alması, taşıma esnasında çalışma ve dinlenme sürelerine uyumu sağlanmalıdır. Tankerin tehlike madde taşınmasına uygun malzeme ve yöntemle imal edilmesi, bu tür kazaların önlenmesinde büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duan, Z., Ren, T., Ding, G. (2017). Experimental and modeling studies on the transient pressurization in response to boiloff vapor recondensation in liquefied gas storage tanks. *Experimental Thermal and Fluid Science* 88, 93-102.

- [2] Bariha, N., Mishra, I. M., Srivastava, V. C. (2016). Fire and explosion hazard analysis during surface transport of liquefied petroleum gas (LPG): A case study of LPG truck tanker accident in Kannur, Kerala, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 40, 449-460.
- [3] Wang, K., Hu, Q., Qian, X., Li, M., Shi, T. (2022). Cause analysis and damage mechanism of explosive destruction with case investigation involving LPG tank trailer. *Engineering Failure Analysis* 133, 1-27.
- [4] Dhurandher, B. K., Kumar, R., Dhiman, A. (2015). Impact Assessment of Thermal Radiation Hazard from LPG Fireball. *Procedia Earth and Planetary Science* 11, 499 – 506.
- [5] Mishra, K.B.(2016). Multiple BLEVE's and fireballs of gas bottles: Case of a Russian road carrier accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 41, 60-67.
- [6] Hemmatian, B., Casal, J., Planas, E., Rashtchian, D. (2019). BLEVE: The case of water and a historical survey. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 57, 231–238.
- [7] Planas, E., Pastor, E., Casal, J., Bonilla, J.M. (2015). Analysis of the boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE) of a liquefied natural gas road tanker: The Zarzalico accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 34, 127-138.
- [8] İnternet: https://www.kmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=1725, Son Erişim Tarihi: 04.02.2022
- [9] Zengin, Y., Dursun, R., İcer, M., Gündüz, E., Durgun, H.M., Erbatur, S., Damar, Ö., Güloğlu, C. (2015). Fire Disaster Caused By LPG Tanker Explosion At Lice In Diyarbakır (Turkey): July 21, 2014. *Burns* 41 (6), 1347-1352.
- [10] İnternet:<https://www.aksam.com.tr/guncel/tanker-faciasinin-bilirkisi-raporu-tamamlandi/haber-340778>, Son Erişim Tarihi: 27.12.2021.
- [11] İnternet:http://www1.mmo.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=39824&tipi=1&sube=6#.Yf2Uf-pBxPY, Son Erişim Tarihi: 04.02.2022.
- [12] İnternet: <https://www.haberler.com/lice-de-tanker-patladi-70-yarali-6287850-haberi/>, Son Erişim Tarihi: 27.12.2021.
- [13] Synčka, F., Čulíka, K., Rievaja, V., Gaňa, J. (2019). Liquefied Petroleum Gas as an Alternative Fuel. 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport (TRANSCOM 2019), Slovakia. 527-534.
- [14] İnternet: KILIÇ, A. LPG Özellikleri Ve Tehlikeleri. URL: http://www.yangin.org/dosyalar/lpg_ozellikleri_ve_tehlikeleri.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.12.2021.
- [15] Türk Standartları Enstitüsü (1995). “TS 1445 Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG)-Taşıma Kuralları”.
- [16] ALOHA Kullanım Kılavuzu, (2007).
- [17] 4925 Sayılı Karayolu Taşıma Kanunu (10.07.2003).
- [18] 2918 Sayılı Karayolları Trafik Kanunu (18.10.1983).
- [19] Karayolu Taşıma Yönetmeliği (08.01.2008).
- [20] Karayolları Trafik Yönetmeliği (17.04.2015).
- [21] Karayolu Taşımacılık Faaliyetleri Mesleki Yeterlilik Eğitimi Yönetmeliği (28.03.2018).
- [22] Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik (18.06.2022).
- [23] Tehlikeli Madde Taşıyan Araç ve Üst Yapıların Teknik Muayeneleri Hakkında Yönetmelik (27.05.2016).
- [24] Çetinyokuş S. (2017). Sonuç Analizi ile Belirlenen Etki Mesafeleri Üzerine Atmosferik Seçimlerin Etkisi (ALOHA Yazılımı), Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17: 209-217.
- [25] Casal, J. (2017). Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. 2nd Ed., Elsevier.
- [26] Quintiere J.G., Harkleroad, M. (1984). New Concepts for Measuring Flame Spread Properties, NBSIR 84-2943. National Bureau of Standards.
- [27] Alfatesha, M.A., Radiah D., Biaka, A. (2019). Analysis of Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) Due To Loss of Containment for Liquefied Petroleum Gas (LPG) Road Tankers. *Journal of Occupational Safety and Health*, 16(2):11-19.
- [28] İnternet: https://www.safteng.net/images/BLEVE-Cause_and_Effects.pdf, Son Erişim Tarihi: 18.10.2022.

- [29] Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires by Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, appendix A, Explosion and Fire Phenomena and Effects, (1996).
- [30] Mcdevitt, C. A., C. K. Chan, F. R. Steward, K. N. Tennankore (1990). Initiation Step of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions. *Journal of Hazardous Materials*, 25:169–180.

A Literature Review on Speech Emotion Recognition Using Deep Learning Techniques

Emrah DİKBİYİK^{1,*}  Önder DEMİR²  Buket DOĞAN² 

¹Istanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Computer Technologies, 34500, Büyükkçekmece/İSTANBUL

²Marmara University, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 34840, Maltepe/İSTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Review article
Received: 1.05.2022
Revision: 2.06.2022
Accepted: 12.06.2022

Highlights

- Current deep learning techniques in Speech Emotion Recognition (SER) applications are reviewed.
- The review includes emotional speech datasets, features and classifiers.
- The review covers emotional speech datasets in Turkish language and SER applications developed with these datasets.

Keywords

Speech Emotion Recognition
Deep Learning
Emotional Speech Datasets
Turkish Emotional Speech

This study includes the results of a literature research prepared by considering speech emotion recognition (SER) applications (we reviewed studies published between 2019 and 2021) in which deep learning methods are used. With the inclusion of deep learning applications in many research areas, the popularity it has gained has also been reflected in SER systems and has been the source of motivation for this literature research study.

Purpose: Within the scope of this study, current studies on SER systems in the literature were examined in detail, and the methods, datasets and requirements used were investigated. The effects of the methods used on the performance of the systems created were examined. Thus, it is aimed to assist researchers who will work to develop new models in this field.

Theory and Methods: SER is actually a pattern recognition application and the steps in a pattern recognition system can also be applied in emotion recognition systems over speech. A traditional SER system includes five main modules: the input speech signal, feature extraction, feature selection, classification, and emotion detection [21]. As can be seen in Figure A, deep learning can automatically learn the functions it needs to fulfill from the signs of picture, video and audio data, unlike classical machine learning methods. Thanks to its flexible structure, estimation accuracy increases depending on the data size.

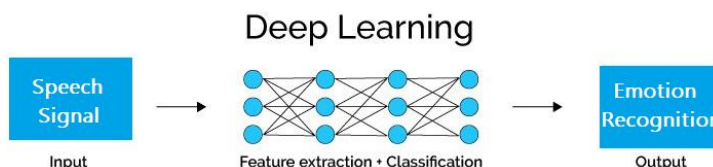


Figure A. Emotion recognition with deep learning

Results: In studies where deep learning models are applied, different input types such as raw speech waveform, spectrogram or log-mel spectrograms are used. It has been observed that especially Recurrent Neural Networks (RNN) and Convolutional Neural Networks (CNN) architectures are frequently applied methods and when the developed models are tested on different datasets, different accuracy in the classification of emotion emerges.

Conclusion: SER is a field of study related to speech processing, and besides speech processing, it has additional challenges that arise due to the extraction of emotion from sound. Because there are cultural and linguistic effects in the expression of emotions. Another challenging aspect of SER applications is adapting them to real-life applications. The increase in the number of datasets obtained from natural and noisy environments and consisting of records of different dialects of languages will contribute to the process of SER systems taking place in our lives in real time. On the other hand, although studies using Turkish datasets have increased recently, it can be said that it is still not at a sufficient level when compared with commonly used datasets. SER applications continue to be a research area with high potential that can take place in our lives in many fields such as education, security, health, marketing, IoT, virtual reality.



A Literature Review on Speech Emotion Recognition Using Deep Learning Techniques

Emrah DİKBIYIK^{1,*} Önder DEMİR² Buket DOĞAN²

¹*Istanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Computer Technologies, 34500, Büyükdere/İSTANBUL*

²*Marmara University, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 34840, Maltepe/İSTANBUL*

Abstract

People's speech varies according to the emotions they are in and contains information about these emotions. Carrying out studies on speech emotion recognition (SER) systems to discover this information has been a remarkable research area. Different datasets were created with the studies, many features of speech were discussed, different classification algorithms were applied for emotion recognition. This study includes the results of a literature research prepared by considering SER applications (we reviewed studies published between 2019 and 2021) in which deep learning methods are used. In addition, the emotional datasets used in these applications were examined and the features used in emotion recognition were included. Unlike other studies, emotional datasets created in Turkish and studies on these data sets are also discussed as a separate section.

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 1.05.2022
Düzeltilme: 2.06.2022
Kabul: 12.06.2022

Keywords

Speech Emotion Recognition
Deep Learning
Emotional Speech Datasets
Turkish Emotional Speech

Anahtar Kelimeler

Konuşmadan Duygu Tanıma
Derin Öğrenme
Duygusal Konuşma Veri Setleri
Türkçe Duygusal Konuşma

Derin Öğrenme Yöntemleri İle Konuşmadan Duygu Tanıma Üzerine Bir Literatür Araştırması

Öz

İnsanların konuşmaları, içinde buldukları duygulara göre değişiklik gösterir ve bu duygularla ilgili bilgiler içerir. Bu bilgileri keşfetmek için konuşmadan duygu tanıma sistemleri üzerine çalışmalar gerçekleştirmek dikkat çeken bir araştırma alanı olmuştur. Yapılan çalışmalarla farklı veri setleri ortaya çıkmış, konuşmaya ait birçok özellik dikkate alınmış ve duygu tanıma için farklı sınıflandırma algoritmaları uygulanmıştır. Bu çalışma, derin öğrenme yöntemlerinin kullanıldığı konuşmadan duygu tanıma uygulamaları (2019-2021 yılları arasında yapılan çalışmalar) dikkate alınarak hazırlanmış bir literatür araştırmasının sonuçlarını içerir. Bununla birlikte bu uygulamalarda kullanılan duygusal veri setleri incelenmiş, duygu tanıma için kullanılan özelliklere yer verilmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak Türkçe dilinde hazırlanmış duygusal veri setleri ve bu veri setleri üzerinde yapılan çalışmalar da ayrı bir bölüm olarak ele alınmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Duygu kavramı “belirli nesne, olay veya bireylerin insanın iç dünyasında uyandırdığı izlenim” olarak tanımlanmaktadır [1]. Her duygu farklı bir durumun işaretçisi olarak kendine has bilgiler içerir. İç dünyamızda şekillendirdiğimiz duygular, içinde bulunduğumuz durumla ilgili herhangi bir mesajı iletmek için çeşitli şiddet düzeylerinde ortaya çıkmaktadırlar [2]. İnsanlarda oluşan bu izlenimi bilgisayar ile keşfetmek, ölçmek ve sınıflandırmak günümüzde yaygın araştırma konularından biridir [3]. İnsanların sesinden, yazdıkları metinlerden veya video görüntülerinden elde edilen veriler bu araştırmalar için önemli bir kaynak oluşturmaktadır. İnsan duygusunun nötr, kızgın, mutlu, üzgün, şaşkınlık veya korku gibi kategorilerden hangisine ait olduğunun tespit edilmesini mümkün kılan bu çalışmaların pazarlama [4], sağlık [5], güvenlik [6], eğitim [7], müzik [8] gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır. İnsanlar genellikle içinde buldukları duygu durumları konuşurken ses özelliklerine, bir metin yazarken veya yine konuşurken kullandıkları kelimelere, kurdukları cümlelere, bir resim veya videoda ise mimiklerine, vücut

hareketlerine yansımaktadır. Duygu analizi üzerine yapılan çalışmalar 1990'ların ortalarından bu yana ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur. Literatürde Duygu analizi ve Fikir/Düşünce madenciliği kavramlarının birbirinin yerine kullanıldığı da görülmektedir. Fikir madenciliği bir ögenin veya varlığın farklı yönleriyle ilgili, öznel kararları çıkarmak ve analiz etmek için otomatik bir yöntem önerir. Duygu analizi ise temel olarak görüşlerin kutuplaşmasına, yani olumlu veya olumsuz otomatik olarak tanınmasına odaklanır [9].

Duygu analizi için hesaplamalı yaklaşımlar dört grupta incelenebilir [9].

1. Metin üzerinde gerçekleştirilen duygu analizi
2. Konuşma üzerinde gerçekleştirilen duygu analizi
3. Görüntü tabanlı duygu analizi
4. Çok modlu duygu analizi

Metin üzerinde duygu analizi gerçekleştirmeye yönelik çalışmalar 2000'lerin başından itibaren ilgi görmeye başlamış özellikle sosyal medya uygulamaları üzerinde yapılan çalışmalarla birlikte sayılarında bir artış yaşanmıştır [10]. Metin üzerinde duygu analizi; dijital metinlere uygulanan, doğal dilin otomatik olarak işlenmesine ait dilsel işlemler kümesidir. Amacı bir metinde ifade edilen duyguları tanımlamak ve verilen bir konuya karşı polariteyi (olumlu ya da olumsuz) tahmin etmektir. Metin üzerinde duygu analizi kelime düzeyinde, cümle düzeyinde ve doküman düzeyinde olmak üzere farklı seviyelerde uygulanabilir ve özellikle sosyal ağ platformlarında insanların görüşlerini kolayca ifade edebilmeleri ile oluşan çok sayıda görüşün otomatik olarak işlenmesi sürecinde oldukça kullanışlıdır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri, sosyal ağlardan elde edilen veri setlerinin çoğalmasında ve fikirlerin tanımlanmasını kolaylaştıran kelimelerin sayısının azalması sayesinde kısa metinlere uygulandığında yüksek performanslara ulaşmaktadır. Bununla birlikte doküman düzeyinde duygu analizi, dokümanların daha çok kelime içermesi ve cümleler arasındaki anlamsal bağlantılar sebebiyle daha karmaşıktır [11].

Konuşma ve duygular üzerine yapılan çalışmalar, geçmişi 1930'lara kadar uzanan önemli bir literatüre sahiptir [12]. Bu uzun geçmişe dayanarak gelişen hesaplamalı yaklaşımlar aracılığıyla konuşma üzerinde duygu analizi gerçekleştirmek ses işleme ile ilgili bir çalışma alanı olmuştur. Bu amaçla geliştirilen sistemlerin giriş verisi bir konuşma içeren ses sinyalıdır. İnsanların sahip olduğu duyguyu bu ses sinyali üzerinden tespit etmek için sesin prozodik özellikler (prosodic features) [13] spektral özellikler (spectral features) [14] gibi farklı özellikleri kullanılabilir. Bu özellikler, konuşmalara ait duyguların sınıflandırılmasında önemli bir rol oynar.

Görüntü temelli duygu analizi, bilgisayarlı görme ile ilgili yeni ve popülerliği artan bir araştırma alanıdır. Görüntü tabanlı duygu analizindeki başlıca araştırma görevleri, yüz veya bedensel hareketler [15,16] ile ilişkili olarak duygunun tespit edilmesi etrafında dönmektedir. Amaç, bir bireyin sergilediği hissi görsel olarak gözlemlenebilir ifadelerinden yola çıkarak modellemek ve tespit etmektir [9].

Çok modlu duygu analizi yaklaşımları metin, ses/konuşma ve görüntü üzerinden yapılan analizlerin duygu yoğunluğunu daha doğru tespit edebilmek için bir arada kullanıldığı yöntemlerdir [17]. Çok modlu duygu analizi ile ilgili literatür daha çok video görüntülerinin de dahil edildiği uygulamaları içermektedir. Zadeh ve ark. 2017 yılında yayınladıkları bir çalışmada çok modlu duygu analizi için tek modlu (unimodal), iki modlu (bimodal) ve üç modlu (trimodal) olmak üzere gruplandırmalar gerçekleştirmiştir. Tek modlu analiz sadece metni, sesi veya görüntüyü kullanmaktadır. Metin, ses ve videonun ikiyeşerli kullanıldığı analizler iki modlu, üçünün bir arada kullanıldığı analizler ise üç modlu olarak tanımlanmıştır [18].

Bu çalışma kapsamında literatürde konuşmadan duygu tanıma yönelik güncel çalışmalar detaylı olarak incelenmiş, kullanılan yöntemler ve gereklilikler araştırılmıştır. Kullanılan yöntemlerin oluşturulan sistemlerde başarımları üzerindeki etkisi incelemiştir. Böylece bu alanda yeni modeller geliştirmek üzere çalışacak araştırmacılara yardımcı olunması amaçlanmıştır. Makalenin geri kalan bölümü şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde konuşmadan duygu tanıma kavramı, bu amaçla geliştirilen sistemlerde kullanılan konuşmaya ait özellikler ve kullanılan duygusal veri setlerine yer verilmiştir. Üçüncü bölümde derin öğrenme yöntemleri kullanılarak geliştirilen güncel konuşmadan duygu tanıma çalışmaları incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise Türkçe dilinde oluşturulmuş duygusal konuşma veri setleri ve bu veri setleri üzerinde yapılan çalışmalara (derin öğrenme yöntemlerinden bağımsız olarak) yer verilmiştir.

Bu literatür araştırması çalışmasında kullanılan terminoloji listesi ise Tablo 1’de açıklanmıştır.

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan terminoloji listesi (Türkçe kısaltmalara göre sıralama yapılmıştır.)

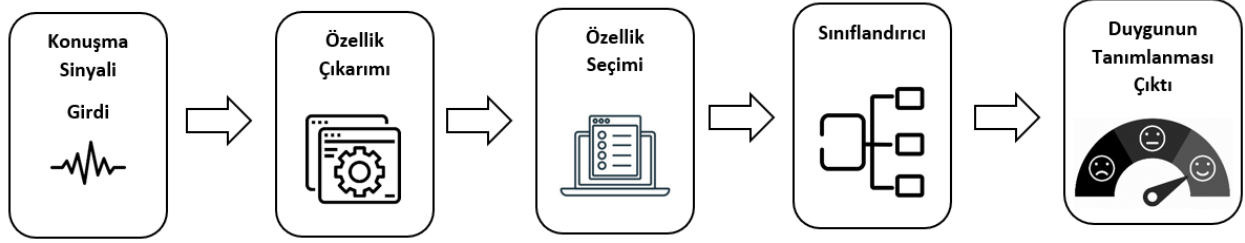
| İngilizce Kısaltma | Açılımı | Türkçe Karşılığı | Türkçe Kısaltması |
|--------------------|---|--------------------------------------|-------------------|
| 1D CNN | 1 Dimensional Convolutional Neural Networks | 1 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı | 1B ESA |
| 2D CNN | 2 Dimensional Convolutional Neural Networks | 2 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı | 2B ESA |
| WAvgRc | Weighted Average Recall | Ağırlıklı Ortalama Duyarlılık | AOD |
| UAR | Unweighted Average Recall | Ağırlıksız Ortalama Duyarlılık | AszOD |
| DBM | Deep Boltzmann Machine | Derin Boltzmann Makinesi | DBM |
| DBN | Deep Belief Network | Derin İnanç Ağı | DİA |
| DTL | Deep Transfer Learning | Derin Öğrenme Aktarımı | DÖA |
| LPCC | Linear Predictive Cepstral Coefficient | Doğrusal Öngörü Kepstral Katsayıları | DÖKK |
| DNN | Deep Neural Networks | Derin Sinir Ağları | DSA |
| LPC | Linear Predictor Coefficient | Doğrusal Tahmin Katsayısı | DTK |
| SVM | Support Vector Machine | Destek Vektör Makinesi | DVM |
| DTW | Dynamic Time Warping | Dinamik Zaman Bükme | DZM |
| CNN | Convolutional Neural Networks | Evrişimsel Sinir Ağları | ESA |
| ConvLSTM | Convolutional LSTM | Evrişimsel Uzun Kısa Süreli Bellek | EUKSB |
| DCNN | Dilated Convolutional Neural Networks | Genişletilmiş Evrişimsel Sinir Ağır | GESA |
| GMM | Gaussian Mixture Model | Gaussian Karışım Modeli | GKM |
| GFLB | Global Feature Learning Block | Global Özellikleri Öğrenme Bloğu | GÖÖB |
| HNR | Harmonic to Noise Ratio | Harmonik Gürültü Oranı | HGO |
| BiLSTM | Bi-directional Long-Short Term Memory | İki Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellek | İY-UKSB |
| SER | Speech Emotion Recognition | Konuşmadan Duygu Tanıma | KDT |
| K-NN | K-Nearest Neighbor | K-En yakın Komşuluk | K-EK |
| GRU | Gated Recurrent Unit | Kapı Yinelemeli Birimler | KYB |
| STFT | Short Time Fourier Transform | Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü | KZFD |
| LFPC | Log Frequency Power Coefficient | Log Frekans Güç Katsayısı | LFGK |
| MFCC | Mel Frequency Cepstral Coefficient | Mel-Frekans Kepstral Katsayısı | MFKK |
| AE | Auto Encoder | Otomatik Kodlayıcı | OK |
| RvNN | Recursive Neural Network | Özyinelemeli Sinir Ağı | ÖSA |
| RBF | Radial Based Function | Radyal Tabanlı Fonksiyon | RTF |

| | | | |
|---------------------------|--|---------------------------------|------|
| ZCR | Zero Crossing Rate | Sıfır Geçiş Oranı | SGO |
| HMM | Hidden Markov Model | Saklı Markov Modeli | SMM |
| SMO | Sequential minimal optimization | Sıralı Minimal Optimizasyon | SMO |
| FCN | Fully Connected Network | Tam Bağlantılı Ağ | TBA |
| TEO | Teager Energy Operator | Teager Enerji Operatörü | TEO |
| RNN | Recurrent Neural Network | Tekrarlayan Sinir Ağı | TSA |
| LSTM | Long Short-Term Memory | Uzun Kısa Süreli Bellek | UKSB |
| DiSA | Directional Self-Attention | Yönlü Öz Dikkat | YÖD |
| LFLB | Local Feature Learning Block | Yerel Özellikleri Öğrenme Bloğu | YÖÖB |
| ANN | Artificial Neural Networks | Yapay Sinir Ağları | YSA |
| Veri seti İsimleri | | | |
| <i>AFEW5</i> | Acted Facial Expression in the Wild | | |
| <i>BAUM</i> | BAHçeşehir University Multimodal Database | | |
| <i>CASIA</i> | Chinese Emotional Speech Corpus | | |
| <i>CREMA-D</i> | Crowd-sourced Emotional Multimodal Actors Dataset | | |
| <i>Berlin Emo-DB</i> | Berlin Database of Emotional Speech | | |
| <i>eINTERFACE</i> | The eINTERFACE'05 Audio-Visual Emotion Database | | |
| <i>GEMEP</i> | Geneva Multimodal Emotion Portrayal | | |
| <i>IEMOCAP</i> | Interactive Emotional Dyadic Motion Capture | | |
| <i>RAVDESS</i> | The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song | | |
| <i>RML</i> | Ryerson Multimedia Lab | | |
| <i>SAVEE</i> | Surrey Audio-Visual Expressed Emotion | | |
| <i>TurES</i> | Turkish Emotional Speech | | |
| <i>TurEV-DB</i> | Turkish Emotion Voice Database | | |

2. KONUŞMADAN DUYGU TANIMA-KDT (SPEECH EMOTION RECOGNITION-SER)

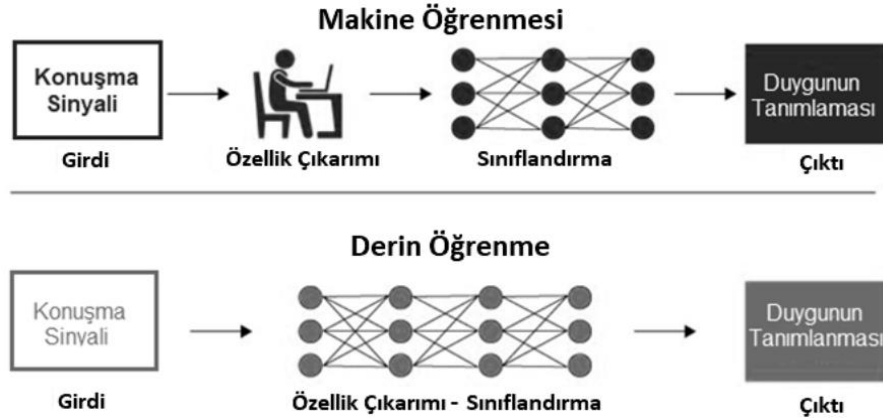
Duygu tespiti basit bir sınıflandırma sorunu değildir. Duyguların ifadesi kültürden kültüre değişiklik gösterebilir, hatta aynı kültür içinde kişiden kişiye göre de değişebilir. Bununla birlikte aynı konuşma, konuşmanın bağlamına göre farklı duyguları içinde barındırabilir. Konuşma üzerinden duygu analizi temelde insanın duygusal durumunu kendi sesinden tanımlayan bir sistemdir. Duygu sınıflandırılmasının etkin bir şekilde yapılabilmesi için birçok akustik özellik (vurgu, perde, tonlama, duraklama, vb. gibi özellikler) araştırılmış ve kullanılmıştır [19]. Konuşmadan duygu tanıma (*KDT*) işlemleri bu akustik özelliklerin değişiklik göstermesi, konuşmaya eklenen şive-ağız ve çevresel faktörler gibi etkenlerden dolayı birtakım zorluklara sahiptir [20].

KDT aslında bir örüntü tanıma uygulamasıdır ve bir örüntü tanıma sisteminde bulunan aşamalar konuşma üzerinden duygu analizi sistemlerinde de uygulanabilir. Geleneksel bir KDT sistemi; Şekil 1’de görüldüğü üzere girdi olan konuşma sinyali, özellik çıkarma, özellik seçimi, sınıflandırma ve duygunun belirlenmesi olmak üzere beş ana modül içerir [21].



Şekil 1. Geleneksel konuşmadan duygu tanımlama sistemi [21]

Bu geleneksel yaklaşımlardan sonra KDT sistemlerinde derin öğrenme mimarileri kullanılarak yapılan çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir. Derin öğrenme, uzun yıllardır yapay zekâ çalışmalarında ortaya çıkan sorunları çözmeye büyük ilerlemeler kaydetmiş ve yüksek boyutlu verilerdeki karmaşık yapıları keşfetmede çok iyi olduğu ortaya çıkmıştır [22]. Derin öğrenme, denetimli ya da denetimsiz olarak nesne tanıma [23], doğal dil işleme [24], özellik çıkartma [25], konuşma tanıma [26] gibi alanlarda kullanılan çok sayıda doğrusal olmayan işlevleri yerine getiren çok katmanlı sinir ağlarından oluşan makine öğrenme çeşididir. Şekil 2’ de görüldüğü üzere derin öğrenme klasik makine öğrenim metodlarının aksine resim, video, ses verilerine ait işaretlerden, yerine getirmesi gereken işlevleri otomatik olarak öğrenebilmekte olup, esnek yapısı sayesinde veri büyüklüğüne bağlı olarak tahmin doğruluğu artmaktadır [27].



Şekil 2. Klasik makine öğrenme yaklaşımı ile derin öğrenme arasındaki fark [27]

Derin Boltzmann Makinesi-DBM (*Deep Boltzmann Machine-DBM*), Tekrarlayan Sinir Ağı-TSA (*Recurrent Neural Network- RNN*) çalışması, Özyinelemeli Sinir Ağı-ESA (*Recursive Neural Network-RvNN*), Derin İnanç Ağı-DİA (*Deep Belief Network-DBN*), Evrimsel Sinir Ağları-ESA (*Convolutional Neural Networks-CNN*) ve Otomatik Kodlayıcı-OK (*Auto Encoder-AE*) gibi derin öğrenme teknikleri, konuşmadan duygu tanıma için kullanılan ve tasarlanan sistemin sınıflandırma performansını pozitif yönde etkileyen yöntemlerdendir [28].

2.1. Konuşmadan Duygu Tanımda Özellikler (Features in Speech Emotion Recognition)

Konuşma üzerinden duygu tanıma gerçekleştirecek sistemin tasarımında en önemli konulardan biri farklı duyguları karakterize eden uygun özelliklerin çıkarılmasıdır. Doğru özelliklerin seçimi sınıflandırma performansını etkiler ve duygu tanıma oranını arttıracaktır. Günümüze kadar geliştirilen sistemlerde farklı özellikler kullanılmıştır fakat ayırt edici ve kesin kabul görmüş bir dizi özellik yoktur [29]. Konuşma sinyalleri değişken uzunluklu sürekli sinyallerdir. Konuşma işlemede bu sinyali çerçeve adı verilen küçük parçalara bölmek yaygın bir yaklaşımdır. Her çerçeve içinde sinyalin neredeyse sabit olduğu kabul edilir. Her çerçeveden çıkarılan perde ve enerji gibi prozodik konuşma özellikleri yerel özellikler olarak

adlandırılır. Öte yandan global özellikler bir ifadeden çıkarılan tüm konuşma özelliklerinin ortalama, minimum, maksimum değer ve standart sapma gibi istatistikleri olarak hesaplanır. Bu nedenle gerekli yaklaşıma bağlı olarak global veya yerel özellikleri çıkarılabilir [30]. Araştırmacılar özellik çıkarma işlemi için çalışmalarında openSMILE [31], Praat [32] gibi yazılım araçlarından faydalanmışlardır [33,34].

Konuşmada yer alan global ve yerel özellikler; prozodik özellikler , niteliksel özellikler (qualitative features), spektral özellikler ve TEO (*Teager Enerji Operatörü*) olmak üzere dört kategoride gruplandırılabilir [30]. Tablo 2’ de bu özelliklere yer verilmiştir.

Tablo 2. Konuşmadan duygu tanımadaki özellikler

| Prozodik Özellikler | Niteliksel Özellikler | Spektral Özellikler | Teager Enerji Operatörü |
|--|---|--|---|
| -Temel Frekans [35] -Enerji özellikleri [19] -Perde özellikleri [36] -Süre özellikleri [37] | -Titreme-Jitter [38] -Parıltı-Shimmer [38] -Harmonik Gürültü Oranı (HGO) [39] | <i>Geleneksel lineer spektral özellikler şunları içerir [42]:</i> -Doğrusal Tahmin Katsayısı-DTK (Linear Predictor Coefficient -LPC) [40], -Log Frekans Güç Katsayısı-LFGK (Log Frequency Power Coefficient LFPC) [41], <i>Kepstral (Cepstrum) özellikleri şunları içerir [42] :</i> - Mel-Frekans Kepstral Katsayısı -MFKK (Mel Frequency Cepstral Coefficient-MFCC) [35] - Doğrusal Öngörü Kepstral Katsayıları-DÖKK (Linear Predictive Cepstral Coefficient- LPCC) [43] | -TEO-FM-Var, TEO-Auto-Env, TEO-CB-Auto-Env -TEO tabanlı özellikler konuşmadaki stresi, tespit etmek için kullanılabilir [44,45] -Konuşma üretiminin doğrusal olmayan hava akımı yapısı hakkında faydalı bilgiler çıkarır [14] |

Daha ayırt edici duygu özelliklerini çıkarmak, araştırmacıların konuşma duygusunu tanımadaki ana görevlerinden biri olmuştur. Özellik çıkarma yöntemlerinin farklılığına göre konuşma öznelikleri manuel (el ile çıkarılmış) özellikler ve öğrenilmiş özellikler olarak sınıflandırılabilir. El ile özelliklerin çıkarılması, tecrübeye dayalı stratejiler kullanılarak dikkatlice tasarlanır ve nasıl çalıştığı ve ne yaptığı daha ayrıntılı olarak açıklanabilir. Derin Sinir Ağları-DSA (*Deep Neural Networks-DNN*) [46,47], ESA [48] gibi farklı derin ağlar tarafından çıkarılan öğrenilmiş özellikler ise tahminde önemli derecede iyi performans gösterir. Bu nedenle, tahminler yapmak için derin özellikleri öğrenmek giderek daha popüler hale gelmiştir [49].

2.2. Veri Setleri (Datasets)

Duygunun otomatik olarak tanımlanması amacıyla önerilen modeller kadar bu modellerin test edildiği veri setleri de çok önemlidir. Çünkü bu veri setlerinin kalitesi duygunun tanıma başarısını etkiler. Veri setlerinde yer alan sinyalin kalitesi kadar çeşitliliği de önemlidir. Örneğin konuşma içeren veri setlerinde

farklı cinsiyetlerde, farklı yaşlarda, farklı dillerde ve farklı duygu gruplarında kayıtların bulunması uygulanacak modelin geçerliliğini güçlendirecektir.

Günümüze kadar görsel, konuşma ve metin içeren veri setleri üzerinde duygu tanımlama amaçlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin Berlin Emo-DB (*Berlin Database of Emotional Speech*) [50] gibi bazı veri setleri sadece konuşma kayıtlarından oluşmaktayken, SAVEE (*Surrey Audio-Visual Expressed Emotion*) [51], RAVDESS (*The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song*) [52] gibi bazı veri setleri hem görsel hem konuşma kayıtlardan oluşmaktadır. Geliştirilen veri setlerinden bazıları doğrudan erişime açık olarak sunulmuşken, bazı veri setleri araştırmacılar için bir kullanım sözleşmesi maili yoluyla ücretsiz indirilebilecek kısıtlı erişime sahiptir. Bunların dışında ticari amaçlı ücretli kullanıma sunulmuş veri setleri de mevcuttur. Duygusal veri setlerinin diğer bir niteliği de kayıtların oluşturulduğu ortamlardır. Çalışmalarda incelenen veri setlerinin birçoğu [50-52,56] belirli ifadelerin aktörler tarafından uygun ortamlarda kaydedilmesi ile oluşturulurken, AFEW 5.0 (*Acted Facial Expression in the Wild*) [53] ve BAUM-1 s (*BAhçeşehir University Multimodal Database*) [54] gibi veri setleri ise spontane(doğal) kayıtlardan oluşmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen araştırmalarda ve incelenen yayınlarda derin öğrenme yöntemleri ile üzerinde çalışmalar yapılmış veri setleri Tablo 3'te nitelikleri ile detaylandırılmıştır.

Tablo 3. Çalışmalarda kullanılan duygusal veri setleri ve barındırdığı duygular, kayıt içerikleri ve kayıt türleri.

| Veri seti | Diller | Yıl | Erişim Türü | Duygular | İçerik-Kayıt Bilgileri | Tür |
|---|-----------|------|----------------|---|---|----------------|
| Berlin Database of Emotional Speech (Berlin Emo-DB) [50] | Almanca | 2005 | Erişime Açık | 7 duygu: öfke, nötr, korku, can sıkıntısı, mutluluk, üzüntü, iğrenme | 10 aktöre (5 erkek + 5 kadın) ait 10 cümle ile oluşturulmuş 800 kayıt | Ses |
| Surrey Audio-Visual Expressed Emotion (SAVEE) [51] | İngilizce | 2011 | Kısıtlı Erişim | 7 duygu: öfke, iğrenme, korku, mutluluk, üzüntü, şaşkınlık ve nötr. | 4 erkek aktöre ait 120 şer cümle toplam 480 kayıt | Ses/ Görsel |
| The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS) [52] | İngilizce | 2018 | Erişime Açık | 7 duygu: sakin, mutlu, üzgün, kızgın, korkmuş, şaşkınlık ve iğrenme | 24 profesyonel aktöre (12 erkek, 12 kadın) ait 7356 kayıt (sadece ses + sadece video + ses ve video) | Ses/ Görsel |
| Acted Facial Expression in the Wild (AFEW5.0) [53] | İngilizce | 2015 | Kısıtlı Erişim | 7 duygu: öfke, sevinç, üzüntü, iğrenme, şaşkınlık, korku ve nötr | 3 yorumcu tarafından ifade edilmiş 1645 kayıt | Ses/ Görsel |
| BAUM-1 s [54] | Türkçe | 2013 | Kısıtlı Erişim | 6 temel duygu: mutluluk, öfke, üzüntü, iğrenme, korku, şaşkınlık. Veri seti bu duygularla birlikte can sıkıntısı ve küçümsemeyi | Veriler 17'si kadın 31 kişiden toplanmıştır. Deneklerin anadili Türkçe ve yaş aralığı 19-65'tir. Ortalama 1,82 saniyelik 1184 | Ses/ Görsel |

| | | | | | | |
|---|-----------|------|----------------|---|--|----------------|
| | | | | yansıtan kayıtları içerir. Ayrıca zihinsel birkaç durum da yer almaktadır: Emin olmama (kafa karışıklığı, kararsız), düşünme, konsantre olma ve rahatsız olma. | klipten oluşmaktadır. | |
| Interactive Emotional Dyadic Motion Capture (IEMOCAP) [55] | İngilizce | 2008 | Kısıtlı Erişim | 5 duygu: mutluluk, öfke, üzüntü, hayal kırıklığı ve nötr. | 10 aktöre (5 erkek + 5 kadın) ait 12 saatlik çok modlu veri kaydı | Ses/ Görsel |
| Crowd-sourced Emotional Multimodal Actors Dataset (CREMA-D) [56] | İngilizce | 2014 | Erişime Açık | 6 duygu: kızgın, iğrenmiş, korkmuş, mutlu, tarafsız ve üzgün | 91 aktöre (48 erkek + 43 kadın) ait toplam 7.442 kayıt | Ses/ Görsel |
| The eINTERFACE'05 Audio-Visual Emotion Database (eINTERFACE) [57] | İngilizce | 2005 | Erişime Açık | 6 duygu: öfke, korku, şaşkınlık, mutluluk, üzüntü ve iğrenme. | 42 denekten (%81'i erkek, %19'u kadın) toplam 1166 video kaydı (264 kadın + 902 erkek) | Ses/ Görsel |
| Chinese Emotional Speech Corpus (CASIA) [58] | Mandarin | 2008 | Ücretli erişim | 5 duygu : öfke, mutluluk, sürpriz, nötr ,üzgün [43] | 4 kişiden alınan kayıt ve kişi başına 1500 duygu ifadesi (her duygu için 300 ifade) | Ses |
| Geneva Multimodal Emotion Portrayal (GEMEP) [59] | Fransızca | 2006 | Kısıtlı Erişim | 12 duygu: pozitif duygular: sevinç, eğlence, gurur, zevk, rahatlama, ilgi. Negatif duygular: öfke, panik, umutsuzluk, gerginlik (irritation), kaygı, üzüntü. 6 ek duygu: Pozitif: Hayranlık, Hassasiyet, Sürpriz Negatif: İğrenme, Aşağılama, Utanç | 10 profesyonel aktörden (5 erkek + 5 kadın) alınan 1260 kayıt | Ses/ Görsel |

| | | | | | | |
|--|--|------|--------------|---|--|-------------|
| Ryerson Multimedia Lab (RML) Emotion Database [60] | İngilizce, Çince (Mandarin), Urduca, Pencapça, Farsça, İtalyanca | 2005 | - | 6 duygu: mutluluk, üzüntü, öfke, korku, sürpriz ve iğrenme | 6 farklı dil konuşan 8 denekten toplam 500 video kaydı | Ses/ Görsel |
| Urdu [61] | Urduca | 2018 | Erişime açık | 4 duygu: kızgın, mutlu, üzgün ve nötr. | 38 kişiden (27 erkek + 11 kadın) elde edilmiş (TV Şovları) toplam 400 ifade | Ses |
| EMOVO [62] | İtalyanca | 2014 | Erişime açık | 7 duygu: iğrenme, korku, öfke, sevinç, şaşkınlık, üzüntü, ve nötr | 6 aktörden (3 erkek + 3 kadın) elde edilen Her duygu için söylenmiş 14 cümle ve toplam 588 ses kaydına | Ses |

3. KONUŞMADAN DUYGU TANIMADA DERİN ÖĞRENME UYGULAMALARI (DEEP LEARNING APPLICATIONS IN SPEECH EMOTION RECOGNITION)

KDT sistemlerinin önemli aşamalarından birisi de sınıflandırma işlemidir. Yapılan çalışmalarda geleneksel sınıflandırıcılar ve derin öğrenme mimarileri olmak üzere gruplandırılacak farklı sınıflandırma yöntemleri denenmiş ve uygulanmıştır. Ancak birçok karmaşık problemde olduğu gibi bu sistemlerde de genel kabul görmüş bir yöntem yoktur [29, 63]. Derin öğrenme makine öğreniminde her geçen gün gelişmekte olan bir araştırma alanı olmakla birlikte son yıllarda daha fazla ilgi görmektedir. Geleneksel KDT sistemlerinde Saklı Markov Modeli-SMM (*Hidden Markov Model HMM*), Gaussian Karışım Modeli-GKM (*Gaussian Mixture Model GMM*), Destek Vektör Makineleri-DVM (*Support Vector Machine-SVM*), Yapay Sinir Ağları-YSA (*Artificial Neural Networks-ANNs*), K En yakın Komşuluk K-EK (*k-Nearest Neighbor K-NN*) gibi çeşitli sınıflandırıcılar kullanılmıştır [64-66]. Birçok hassas hesaplama ve ön işleme gibi mühendislik özellikleri gerektiren bu yöntemlerde özelliklerdeki herhangi bir değişiklik, tekniğin genel mimarisinin yeniden modellenmesini gerektiriyordu [67].

KDT sistemlerinde derin öğrenme teknikleri, geleneksel yöntemlere göre; özellikleri ve karmaşık yapıları manuel olarak ayarlamaya gerek kalmadan tespit edebilmesi, düşük seviyeli özelliklerin çıkarılması, etiketlenmemiş verilerle başa çıkma yeteneği gibi çeşitli avantajlara sahiptir. Yapılan çalışmalarda DSA ve ESA gibi ileri beslemeli mimariler, görüntü ve video işleme için verimli sonuçlar sağladığı görülmüştür [28]. Öte yandan, ESA, TSA ve Uzun Kısa Süreli Bellek-UKSB (*Long Short-Term Memory-LSTM*) gibi tekrarlayan mimariler, konuşmadan duygu tanıma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan derin öğrenme mimarileridir [68].

Bu bölümde KDT uygulamaları için yakın zamanda geliştirilen modelleri öğrenmek adına 2019-2021 yılları arasında gerçekleştirilmiş ve derin öğrenme tekniklerinin kullanıldığı KDT uygulamalarına ait bir literatür araştırması sunulmuştur. Sunulan çalışmalarda derin öğrenme mimarileri konuşma özelliklerinin otomatik olarak öğrenilmesi ve/veya son aşamada duygunun sınıflandırılması amacıyla kullanılmıştır.

Demir ve ark. derin öğrenme yöntemlerini kullanarak sesin duygulara göre ayırt edici özelliklerinin kullanan bir otomatik duygu tanıma sistemi önermişlerdir. Çalışmalarında RAVDESS, SAVEE ve RML

veri setlerini kullanmışlardır. Özellik çıkartma aşamasında çalışma kapsamında, MFKK, DTK, DÖKK, spektral alt-bant ağırlık merkezi, yansıma katsayıları, log-alan oranları katsayıları ve log-enerji özellikleri kullanılmıştır. Sınıflandırma işleminde ise UKSB kullanılmış ve RAVDESS veri setinde %68,8, SAVEE veri setinde %72,13, RML veri setinde %70,35 sınıflandırma doğruluğuna ulaşmışlardır [69].

Meng ve ark. 2019 yılında yayınlanan çalışmalarında konuşmadan duygu tanıma için yeni bir derin öğrenme modeli önermişlerdir. Bu model artık blok ile Genişletilmiş Evrişimsel Sinir Ağı-GESA (*Dilated Convolutional Neural Networks-DCNN with residual block*) ve dikkat mekanizmasına dayalı İki Yönlü Uzun Kısa Süreli Bellekten İY-UKSB (*Bi-directional Long-Short Term Memory-BiLSTM*) oluşan ADRNN çerçevesidir. Modelin avantajları olarak uzun süreli dizileri eğitmek için daha az belleğe ihtiyaç duyması, TSA ile karşılaştırıldığında evrişim işlemini daha kolay hale getirmesi ve hangi içeriğin hatırlanması gerektiği ile ilgili daha faydalı geçmiş bilgilerini kullanma gibi avantajlar belirtmişlerdir. Konuşma sinyalinde elde edilen 3B Log-Mel spektrum özneliklerini ise sınıflandırmak için geliştirdikleri modelde kullanmışlar ve uygulamalarını Berlin Emo-DB ve IEMOCAP veri setlerinde test etmişlerdir. Sonuç olarak Berlin Emo-DB de konuşmacıya bağlı deneylerde %90,78, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %85,39 tanıma doğruluğu, IEMOCAP'de ise konuşmacıya bağlı deneylerde %74,96 konuşmacıdan bağımsız deneylerde ise %69,32 tanıma doğruluğu elde etmişlerdir [70].

Zhao ve ark. tarafından 1 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı-1B ESA (*1 Dimensional Convolutional Neural Networks-1D CNN*) ve 2 Boyutlu Evrişimsel Sinir Ağı-2B ESA (*2 Dimensional Convolutional Neural Networks-2D CNN*) UKSB ağları üzerine gerçekleştirilen çalışmada Berlin Emo-DB ve IEMOCAP veri setleri kullanılmıştır. Özellikle 2B ESA UKSB ağının, seçilen veri setlerinde DİA ve ESA yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Konuşmacıya bağlı ve konuşmacıdan bağımsız deneylerde geleneksel yaklaşımlarla elde edilen %91,6 ve %92,9 doğrulukla karşılaştırıldığında, Berlin Emo-DB'sinde sırasıyla %95,33 ve %95,89 tanıma doğruluğuna ulaşmıştır. Ayrıca IEMOCAP veri setinde konuşmacıya bağlı ve konuşmacıdan bağımsız deneylerde DİA ve ESA tarafından elde edilen %73,78 ve %40,02 doğruluktan çok daha yüksek olan %89,16 ve %52,14 tanıma doğruluğuna ulaşılmıştır [49].

Xie ve ark. 2019 yılında yaptıkları çalışmada zaman çerçeveleri arasındaki duygusal doygunluk farkından tam olarak yararlanmak için, dikkat temelli UKSB tekrarlayan sinir ağları ile birleştirilmiş çerçeve düzeyinde konuşma özelliklerini kullanan yeni bir yöntem önermişlerdir. Model, çerçeve düzeyinde konuşma özelliğini girdi olarak alır ve 2 katmanlı UKSB aracılığıyla her çerçevenin zamanına karşılık gelen çıkışı elde eder. Model zaman ve özelliklerdeki duygu farkını ayırt etmek için, UKSB çıktısı üzerinde sırasıyla zaman boyutu ve özellik boyutu üzerinde ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirir ve iki ağırlıklı sonucu tam bağlantı katmanlarının girdisi olarak oluşturur. Son olarak, softmax katmanının çıktısı ile duygu tanıma işleminin sonucu elde edilir. Geliştirilen model CASIA, eNTERFACE ve GEMEP duygusal veri setlerinde denenmiştir. Hem zaman hem özellik boyutlarında dikkat mekanizmasına dayalı modelin unutmaya kapısı varyasyonu (*LSTM-(time and feature dimensions)-TF-at*) ile denenilen model CASIA veri setinde %92,8, eNTERFACE veri setinde %89,6, GEMEP veri setinde %57,0 Ağırlıksız Ortalama Duyarlılık-AszOD (*Unweighted Avarage Recall-UAR*) sonuçlarına ulaşmıştır [71].

Jalal ve ark. 2020 yılındaki çalışmalarında her ikisi de dikkat mekanizması temelli olan ESA ve İY-UKSB modelleri ile geliştirdikleri KDT uygulamasını sunmuşlardır. 23 boyutlu log-Mel filtre bankası özellikleri ile çalışmışlardır. Önerilen ağ modellerinde dikkat ağırlıklarının büyük ölçüde ünlü seslerine meyilli olduğu ve akustik bağlam ve prozodiden önce/sonradan söze önem verdiği gösterilmiştir. Daha önce varsayıldığı gibi, daha küçük akustik bağlamın duyguları taşımada hayati olduğu da gösterilmiştir. Modellerini IEMOCAP veri setinde test etmişlerdir. Saf akustik verilerde %80,1 ile kendilerinden önceki modellerden daha yüksek ağırlıksız doğruluk oranı elde etmişlerdir [72].

Aouani ve Ayed 2020 yılında yayınladıkları çalışmalarında özellik çıkarma ve sınıflandırma motoru olarak adlandırdıkları iki aşamalı bir konuşmadan duygu tanıma modeli önermişlerdir. Özellik çıkarımı aşamasında 39 katsayılı MFKK, Sıfır Geçiş Oranı-SGO (*Zero Crossing Rate-ZCR*), HGO ve TEO içeren 42 boyutlu bir öznelik vektörü çıkarılmıştır. Burada ilgili parametrelerin seçimi için OK yönteminin kullanılmasını önermişler ve sınıflandırma işlemini DVM ile gerçekleştirmişlerdir. Önerilen model RML veri setinde denenmiş ve %74,07 sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir [39].

Issa ve ark. yayınladıkları çalışmada RAVDESS, Berlin Emo-DB, IEMOCAP veri setlerinde uygulamalarını gerçekleştirdikleri yeni bir model sunmuşlardır. Konuşma kayıtlarından MFKK'lar, Mel ölçekli spektrogram, Kromagram, Spektral kontrast özelliği, Tonnetz temsili olmak üzere beş farklı özellik çıkarmışlardır. Bu özellikler kullanılarak 1B ESA ile sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Önerdikleri model, 8 sınıflı RAVDESS için %71,61, 7 sınıfta 535 örnekle Berlin Emo-DB için %86,1, 7 sınıfta 520 örnekle Berlin Emo-DB için %95,71 ve 4 sınıflı IEMOCAP için %64,3 sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir [73].

Mustaqeem ve Kwon yayınladıkları çalışmada KDT sistemleri için Evrişimsel Uzun Kısa Süreli Bellek-EUKSB (*Convolutional LSTM-ConvLSTM*) modelini önermişlerdir. Önerilen model mimarisi Kapı Yinelemeli Birimler-KYB (*Gated Recurrent Unit-GRU*) lerini kullanan Global Özellikleri Öğrenme Bloğu-GÖÖB (*Global Feature Learning Block GFLB*), EUKSB'yi kullanan Yerel Özellikleri Öğrenme Bloğu-YÖÖB (*Local Feature Learning Block-LFLB*) ve bir önileme adımı ile merkez kayıplarını ve softmax kayıplarını kullanan çok-sınıflı sınıflandırıcı katmanı olmak üzere üç modülden oluşmaktadır. Önerilen sistemi IEMOCAP ve RAVDESS veritabanlarında test etmişler ve sırasıyla %75 ve %80 tanıma oranı elde etmişlerdir [74].

2020 yılında Mustaqeem ve ark. tarafından yapılan çalışmada tanıma doğruluğunu iyileştirmek, model maliyetini ve işlem süresini azaltmak için yeni bir KDT yaklaşımı sunulmuştur. Konuşmadan daha verimli bir dizi seçmek amacıyla Radyal Tabanlı Fonksiyon-RTF (*Radial Based Function-RBF*) tabanlı K-means kümeleme algoritmasını kullanılmış ve bu dizi Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü-KZFD (*Short Time Fourier Transform-STFT*) algoritması ile spektrogramlara dönüştürülmüştür. Daha sonra ResNet fc-1000 katmanlarını kullanarak konuşma sinyali spektrogramlarından özellik çıkarma işlemi gerçekleştirilmiş ve sınıflandırma İY-UKSB ile uygulanmıştır. Önerilen sistem, IEMOCAP, Berlin Emo-DB ve RAVDESS olmak üzere farklı standart veri setleri üzerinden değerlendirilmiştir. Duygu tanıma doğruluğu, IEMOCAP, Berlin Emo-DB ve RAVDESS veri setlerinde sırasıyla %72,25, %85,57 ve %77,02 olarak elde edilmiştir [75].

Anvarjon ve ark. 2020 yılında yayınlanan çalışmalarında düşük hesaplama karmaşıklığına ve yüksek tanıma doğruluğuna sahip yeni bir hafif etkili KDT modeli önermişlerdir. Bu model konuşmadan duygu tanıma için daha fazla ayırt edici güce sahip değiştirilmiş bir örnekleme (pooling) stratejisi ile düz bir dikdörtgen çekirdek (rectangular kernel) kullanarak derin frekans özelliklerini öğrenmek için ESA yaklaşımını kullanır. Önerilen ESA modeli derin frekans özelliklerini analiz ederek gizli duygusal özellikleri tanımak için ağırlıklı olarak konuşma spektrogramlarındaki frekans özelliklerine odaklanmaktadır. Maliyet karmaşıklığını azaltmak için daha az parametre kullanılmıştır. Sistem IEMOCAP ve Berlin Emo-DB veri setlerinde test edilmiştir ve sırasıyla %77,01 ve %92,02 tanıma sonucu edilmiştir [76].

2021 yılında yayınlanan çalışmalarında Li ve ark. KDT için Yönlü Öz Dikkat-YÖD (*Directional Self-Attention-DiSA*) ağı ile İY-UKSB modelini önermişlerdir. Model mimarisinde konuşma sinyali özellikleri sırasıyla ileri ve geri İY-UKSB tarafından çözülür ardından bunlar YÖD mekanizması ile kodlanır. Konuşma sinyaline ait openSmile tarafından çıkarılan düşük seviyeli tanımlayıcı özellikler arasında MFKK, spektral yuvarlanma noktası, spektral akı, spektral merkez, spektral entropi, spektral yayılma, SGO, temel frekans, enerji, enerji entropisi ve bunların birinci dereceden farkı bulunur. Modellerini IEMOCAP ve Berlin Emo-DB veritabanlarında test etmişler ve sırasıyla %61,20 %85,95 ağırlıklı doğruluk elde etmişlerdir [77].

Mustaqeem ve Kwon 2021 yılında yayınlanan çalışmalarında 1B ESA'na dayanan uçta uca gerçek zamanlı bir KDT sistemi önermişlerdir. Önerilen sistem, ham sesli konuşmadan yerel özellikleri öğrenmek için kullanılan GESA'dan, yerel öğrenilmiş özellikleri geliştirme bloğu (Upgrade Features Learning Block-UFLB) için atlama bağlantılı tek boyutlu artık bloklardan (Residual Blocks with a Skip Connection-RBSC) ve sıralama modülünden (Seq_L) oluşur. Sistem RBSC ve Seq_L blokları ile çoklu tip özellikleri öğrenir. Füzyon katmanı ise Tam Bağlantılı Ağ-TBA (*Fully Connected Network - FCN*)'dan geçirilen uzamsal ve zamansal bilgileri ve nihai karar için kullanılan softmax katmanını birleştirmek için kullanılır. Önerdikleri

modeli IEMOCAP ve Berlin Emo-DB veri kümelerini kullanarak değerlendirmişler ve sırasıyla %73 ve %90 olan tanıma doğruluğu elde etmişlerdir [78].

Yusuf ve ark. çalışmalarında KDT sistemlerinde veri azlığı ve çevresel gürültüyü iki önemli sorun olarak belirtmişlerdir. Bu sorunları çözmek üzere Derin Öğrenme Aktarımı-DÖA (*Deep Transfer Learning-DTL*) kullanarak konuşmadan duygu tanıma için yeni bir sağlam çok pencerele spektrogram artırım (*Robust Multi Window Spectrogram augmentation - RMWSaug*) modelini önermişlerdir. Denemelerinde IEMOCAP veri setini ikiye bölerek kullanmışlardır. AHSN olarak isimlendirilen kısım öfkeli, mutlu, üzgün ve nötr duygusal konuşma örneklerinden oluşmakta, AESN olarak isimlendirilen kısım ise öfke, heyecan, üzgün ve nötr duygusal konuşma örneklerinden oluşmaktadır. Bu veri setlerinde temiz konuşma örnekleri, 15dB,20dB ve 40dB gürültülü konuşma örnekleri üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir. AHSN veri setinde Ağırlıklı Ortalama Duyarlılık-AOD (*Weighted Average Recall-WAvgRc*) değeri temiz konuşma örneklerinde %65,61 , 40db gürültülü örneklerde 65,90 olarak bulunmuş, AESN veri setinde AOD değeri temiz konuşma örneklerinde %62,99, 40db gürültülü örneklerde %62,81 olarak bulunmuştur [79].

Zhang ve ark. 2021 yılında yayınlanan çalışmalarında doğal konuşmadan duygu tanıma için çoklu ESA'lar ile derin çok modlu özellikleri öğrenmek amaçlı bir mimari sunmuşlardır. Önerdikleri yöntem üç adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda uygun çok modlu ses temsillerinin oluşturulması, ikinci adımda çoklu ESA'lar ile çok modlu ses özelliklerinin öğrenilmesi (1B, 2B ve 3B ESA'dan öğrenilen derin çok modlu özellikler), üçüncü adımda çok modlu sonuçları puan düzeyinde birleştirme işlemleri gerçekleşir. Geliştirdikleri modellerini AFEW 5.0 ve BAUM-1 s veri setlerinde test etmişlerdir. Sonuç olarak AFEW 5.0 veri seti için %35,77 doğruluk oranı, BAUM-1 s veri seti için ise %44,06 doğruluk oranı elde edilmiştir [80].

İncelenen çalışmaların birçoğunda girdi olarak konuşmaya ait elde edilen spektral özelliklerin kullanılmış ve sınıflandırmada aşamalarında ise ESA, TSA, UKSB gibi mimariler tercih edilmiştir. Yukarıda açıklanan çalışmalara ait kullanılan veri setleri, özellikler, sınıflandırıcı yöntemleri ve elde edilen sonuçların listesi Tablo 4' te özet halinde sunulmuştur.

Tablo 4. Çalışmaların listesi

| Makale Başlığı | Kullanılan Veri seti(leri) | Özellikler | Sınıflandırıcı | Sonuçlar |
|--|----------------------------|--|---|---|
| Deep learning and audio based emotion recognition (2019) [69] | SAVEE, RAVDESS, RML | MFKK, DTK, DÖKK, spektral alt-bant ağırlık merkezi, yansıma katsayıları, log-alan oranları katsayıları ve log-enerji özellikleri | UKSB | RAVDESS veri seti için %68,8 SAVEE veri seti için %72,13 RML veri seti için %70,35 doğruluk oranları |
| Speech emotion recognition from 3D log-mel spectrograms with deep learning network (2019) [70] | Berlin Emo-DB, IEMOCAP | 3-B Log-Mel spektrumları | ADRNN (dikkat mekanizmasına dayalı artık blokları genişletilmiş ESA ve İY-UKSB) | IEMOCAP veri seti için konuşmacıya bağlı deneylerde %74,96, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %69,32. Berlin Emo-DB veri seti için konuşmacıya bağlı deneylerde %90,78, konuşmacıdan bağımsız |

| | | | | |
|---|-------------------------------------|--|--|---|
| | | | | deneysel %85,39 doğruluk oranları |
| Speech emotion recognition using deep 1D & 2D CNN LSTM networks (2019) [49] | Berlin Emo-DB, IEMOCAP | ESA ve UKSB ile öğrenilen yerel ve global özellikler | 2B ESA-UKSB | Berlin Emo-DB veri seti için konuşmacıya bağlı deneylerde %95,33, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %95,89 IEMOCAP veri seti için konuşmacıya bağlı deneylerde %89,16, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %52,14 doğruluk oranları |
| Speech emotion classification using attention-based LSTM (2019) [71] | CASIA, eINTERFACE, GEMEP | openSMILE ComParE özelliklerine dayalı çerçeve düzeyinde özellikler. (bir kısmı: log harmonik gürültü oranı, perde frekansı, F0 zarfı, ses yüksekliği, MFKK) | UKSB | CASIA veri setinde %92,8, eINTERFACE veri setinde %89,6, GEMEP veri setinde %57,0 ağırlıksız ortalama recall (UAR) oranları |
| Empirical Interpretation of Speech Emotion Perception with Attention Based Model for Speech Emotion Recognition (2020) [72] | IEMOCAP | 23 boyutlu log-Mel filtre bankası özellikleri | dikkat mekanizmasına dayalı ESA ve İY-UKSB | %80,1 ağırlıksız doğruluk oranı |
| Speech emotion recognition with deep learning. (2020) [39] | Ryerson Multimedia Laboratory (RML) | MFKK,SGO, HGO ve TEO | Özellik seçiminde OK, sınıflandırma için DVM | %74,07 doğruluk oranı |
| Speech emotion recognition with deep convolutional neural networks. (2020) [73] | RAVDESS, Berlin Emo-DB, IEMOCAP | MFKK, Mel ölçekli spektrogram, Kromagram, Spektral kontrast özelliği, Tonnetz sunumu | 1B ESA | RAVDESS veri setinde 8 duygu sınıfı için %71,61, Berlin Emo-DB veri setinde 535 örnekle 7 duygu sınıfı için %86,1 520 örnekle uygulamada %95,71 |

| | | | | |
|---|---|---|---------------------|---|
| | | | | IEMOCAP veri setinde 4 duygu sınıfı için %64,3 doğruluk oranları |
| CLSTM: Deep feature-based speech emotion recognition using the hierarchical ConvLSTM network (2020) [74] | IEMOCAP, RAVDESS | EUKSB ile öğrenilen yerel özellikler, KYB ile öğrenilen global özellikler | EUKSB | IEMOCAP veri setinde %75, RAVDESS veri setinde %80 doğruluk oranları |
| Clustering-based speech emotion recognition by incorporating learned features and deep BiLSTM (2020) [75] | IEMOCAP, Berlin Emo-DB, RAVDESS | ESA ile öğrenilen özellikler | İY-UKSB | IEMOCAP veri setinde %72,25, Berlin Emo-DB veri setinde %85,52, RAVDESS veri setinde %77,02 doğruluk oranı |
| Deep-net: A lightweight CNN-based speech emotion recognition system using deep frequency features (2020) [76] | IEMOCAP, Berlin Emo-DB, | ESA ile öğrenilen yüksek seviye derin frekans özellikleri | ESA | IEMOCAP veri setinde %77,01, Berlin Emo-DB veri setinde %92,02 ağırlıksız doğruluk oranı |
| Speech emotion recognition using recurrent neural networks with directional self-attention (2021) [77] | IEMOCAP, Berlin Emo-DB | openSmile tarafından çıkarılan düşük seviyeli tanımlayıcı özellikler (Bir kısmı: MFKK, spektral yuvarlanma noktası, spektral akı, spektral merkez, spektral entropi, spektral yayılma, sıfır geçiş oranı) | YÖD ağı ile İY-UKSB | IEMOCAP veri setinde %61,20, Berlin Emo-DB veri setinde %85,95 ağırlıklı doğruluk oranı, IEMOCAP veri setinde %54,99 , Berlin Emo-DB veri setinde %82,6 ağırlıksız doğruluk oranı |
| MLT-DNet: Speech emotion recognition using 1D dilated CNN based on multi-learning trick approach (2021) [78] | IEMOCAP, Berlin Emo-DB | GESA ile öğrenilen yerel özellikler, KYB ile öğrenilen global özellikler | 1B GESA | IEMOCAP veri setinde %73, Berlin Emo-DB veri setinde %90 duyarlılık (recall) |
| RMWSaug: Robust Multi-window Spectrogram Augmentation Approach for Deep Learning | IEMOCAP veri setinin AHSN olarak isimlendirilen kısım öfkeli, mutlu, üzgün ve nötr duygusal | ESA ile öğrenilen özellikler | DÖA | AHSN olarak isimlendirilen kısımda %65,61 , 40db gürültülü örneklerde 65,90 ağırlıklı ortalama recall oranı, |

| | | | | |
|--|---|---|--|--|
| based Speech Emotion Recognition (2021) [79] | konuşma örneklerinden oluşmakta, AESN olarak isimlendirilen kısım ise öfke, heyecan, üzgün ve nötr duygusal konuşma örneklerinden oluşmaktadır. | | | AESN olarak isimlendirilen kısımda temiz konuşma örneklerinde %62,99, 40db gürültülü örneklerde %62,81 ağırlıklı ortalama recall oranı |
| Learning deep multimodal affective features for spontaneous speech emotion recognition (2021) [80] | AFEW 5.0, BAUM-1 s | 1B, 2B ve 3B ESA ile öğrenilen özelliklerin birleştirilmesi ile oluşturulan özellik vektörü | Duygu sınıflandırması için son aşamada DVM | AFEW 5.0 veri seti için %35,77 doğruluk oranı, BAUM-1 s veri seti için ise %44,06 doğruluk oranı |

4. TÜRKÇE DUYGUSAL KONUŞMA VERİ SETLERİ VE DUYGU TANIMA UYGULAMALARI (TURKISH EMOTIONAL SPEECH DATASETS AND EMOTION RECOGNITION APPLICATIONS)

KDT sistemlerinde Türkçe veri setleri üzerinde çalışmalar yapmak da araştırmacılar için dikkat çeken alanlardan biri olmuştur. Bu bölümde Türkçe veri setleri üzerinde gerçekleştirilmiş çalışmalara daha geniş bir tarih aralığında yer verilmiştir. Bununla birlikte derin öğrenme yöntemleri dışında geleneksel yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalara da yer verilmiştir.

Türkçe duygusal konuşma veri setleri üzerine yapılan ilk çalışmalardan birisi 2011 yılında Oflazoğlu ve Yıldırım'ın gerçekleştirdiği "Türkçe Duygusal Konuşma Veritabanı" çalışmasıdır. Bu veri setinde 55 adet Türkçe filminden çıkarılmış 5304 tane konuşma sinyali ve bunların metinsel içeriklerinden oluşmaktadır. Konuşma sinyalleri mutlu, şaşkın, üzgün, kızgın, korku, nötr gibi duygulara kategorilendirilmiş hem de değerlik, aktivasyon ve baskınlık olmak üzere 3 boyutlu duygu uzayında etiketlenerek veri seti oluşturulmuştur [81].

Yine Oflazoğlu ve Yıldırım 2013 yılında yayınladıkları çalışmalarında Türkçe konuşmalardan akustik özelliklere göre duygu tespiti gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, daha önceki çalışmalarında oluşturdukları duygusal konuşma veri tabanını (TurES-Turkish Emotional Speech) üzerinde konuşmaların akustik özelliklerini kullanarak dört temel duygu sınıfının (nötr, üzgün, mutlu ve kızgın) sınıflandırması ve ilk duygu tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla VAM (*The Vera am Mittag German audio-visual emotional speech database*) [82] veri seti ile çapraz deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada LIBSVM kütüphanesi ile uygulanan radyal temel çekirdek fonksiyon ile DVM (SVM-RBF)'nin ve Weka uygulaması tarafından sağlanan Bayes Ağının (BayesNet) performanslarını değerlendirmişlerdir [83].

Önder ve ark. 2013 yılında yayınladıkları çalışmaları ile BAUM-1 (BAhçeşehir University Multimodal Database-1) olarak isimlendirdikleri görsel işitsel Türkçe duygusal veri setini sunmuşlardır. Veri setinin oyunculuk gösterilerek oluşturulmuş kısmını BAUM-1 a (acted) , doğal (spontane) oluşturulmuş kayıtlardan oluşan kısmını ise BAUM-1 s (spontaneous) olarak etiketlendirmişlerdir. BAUM-1 a mutluluk, üzüntü, kızgınlık, tikslenme, sıkılma, ilgi(merak), korku, kafa karışıklığı, nötr ve şaşırma olmak üzere 10 duygu v içeren 278 video kayıttan oluşmaktadır. BAUM-1 s veri seti ise öfke, korku, iğrenme, mutluluk, üzüntü, sürpriz, can sıkıntısı, aşağılama, kafa karışıklığı, nötr, düşünme hali, konsantre olma durumu ve rahatsız olma olmak üzere 13 duygusal ve zihinsel durum içeren 1222 video kayıttan oluşmaktadır. Kayıtların alındığı denekler 18-66 yaş aralığında 13 kadın, 18 erkek toplam 31 kişiden oluşmaktadır. Aynı zamanda oluşturulan veri seti üzerinde DVM kullanarak duygu tanıma ile ilgili uygulamalar

gerçekleştirmişlerdir. Bu uygulamalar içinde eNTERFACE veri seti de sonuçların karşılaştırılması bakımından kullanılmıştır. BAUM-1 a kayıtlarında yapılan konuşmadan duygu tanıma deneylerinde beş duygu için %71 civarında bir duygu tanıma oranı, eNTERFACE veri setinde %73 bir duygu tanıma oranı elde edilmiş ve bu oranlar uyumlu olarak yorumlanmıştır [54].

Eroğlu Erdem ve ark. 2015 yılında yayınlanan çalışmalarında ilk olarak farklı dillerdeki filmlerden ve TV programlarından görsel-işitsel yüz video klipleri çıkarabilen yarı otomatik bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemle oluşturdukları görsel-işitsel veri setini BAUM-2 olarak isimlendirmişlerdir. Bu video kayıtlarındaki tepe karelerden elde edilen resimler ile de BAUM-2i olarak isimlendirdikleri bir veri seti oluşturmuşlardır. Kayıtlar 5-73 yaş aralığında, 118'i kadın 168'i erkek olmak üzere 286 aktörden elde edilmiştir. 616'sı Türkçe, 431'i İngilizce olmak üzere toplam 1047 kayıt yer almaktadır. Mutluluk: 248, öfke: 173, üzüntü: 137, iğrenme: 51, sürpriz: 152, korku: 68, aşağılama:49, nötr: 169 olmak üzere 8 farklı duyguyu barındırmaktadır [84].

Kaya ve ark. 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında Meral ve ark. tarafından oluşturulan Boğaziçi Üniversitesi Duygusal Konuşma Veritabanını (BÜ-EE Duygulu Konuşma Veritabanı) [85] kullanmışlardır. Bu veritabanı 11 amatör aktörün 11 duygusal olarak tanımsız cümleyi Stanislavski etkisi kullanarak 4 ayrı duygu durumu (sevinç, olağan, kızgınlık, üzüntü) ile canlandırdığı toplam 484 kayıttan oluşmaktadır. Bu veritabanı üzerinde eğitim, geçerleme ve test kümeleri tanımlanmış, DVM ve Rassal Ormanlar ile referans sonuçlar elde edilmiştir. Test kümesinde en iyi sonuç %64,20 ile doğrusal çekirdekli DVM ile elde edilmiştir [86].

Parlak ve ark. 2014 yılında yayınladıkları çalışmalarında EmoSTAR ismini verdikleri bir veri setini tanıtmışlardır. Televizyon ve internetteki kaynaklardan derlenerek hazırlanmış bir veri setidir. Toplamda 393 olmak üzere kızgın, nötr, mutlu ve üzgün Türkçe ve İngilizce örneklerden oluşmaktadır. Yayınladıkları bu çalışmadan Berlin Emo-DB veri seti ile çapraz testler gerçekleştirmişlerdir. Sınıflandırma işlemlerini ise Naive Bayes ve DVM (Sıralı Minimal Optimizasyon-SMO) algoritmaları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Farklı özellik seçme yöntemlerini de kullanarak yaptıkları denemelerde DVM-SMO sınıflandırıcı ile en yüksek %97,20 başarı oranı ile iyi bir sonuç elde edilmiştir [87].

Oflazoğlu ve Yıldırım 2015 yılında sundukları bir diğer çalışmalarında Türkçe duygusal konuşmaların sınıflandırılmasında ikili sınıflandırma (binary classification) performanslarını hesaplamışlardır. TurES veri setinde yer alan 4 temel duygu sınıfına (mutlu, kızgın, üzgün, nötr) ait konuşma sinyalleri üzerinde başarıları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada konuşma sinyallerine ait akustik özniteliklerden yararlanılmıştır. Öznitelikler OpenSMILE yazılımı ile elde edilmiştir. Duyguların sınıflandırılmasında ise DVM, Bayes Ağı ve WEKA'da yer alan J48 karar ağacı sınıflandırıcıları kullanılmıştır. İkili duygu sınıflarının tahmininde başarı oranı, DVM ve Bayes Ağı ile kızgın-üzgün, kızgın-nötr duyguları için yaklaşık %80 bir ağırlıksız toplam doğruluk olarak hesaplanmıştır. En düşük başarı oranı ise mutlu-nötr duygusu için %64 olarak elde edilmiştir [88].

Korkmaz ve Atasoy 2015 yılında yayınladıkları çalışmalarında DVM ve k-en yakın komşuluk sınıflandırma algoritmaları kullanarak ses sinyali üzerinde mutlu, kızgın, nötr ve üzgün olmak üzere dört farklı duygu için tanıma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında EmoSTAR [50] veri setini kullanmışlardır. Konuşma sinyallerinin duygusal içeriği için mel frekans kepsral katsayıları incelenmiştir. MFKK'nın istatistiksel değerleri ve MFKK'nın enerji, sıfır kepsral katsayısı, birinci türevi, ikinci türevi incelenmiş ve çıkarılan özellikler sırasıyla DVM ve K-EK sınıflandırıcıları kullanılarak analiz edilmiştir. Daha sonra, MFKK üzerinde farklı çerçeve uzunluğu ve kaydırma süresinin sonuçları DVM ve K-EK algoritmaları için incelenmiştir. En iyi sonuçlar MFKK'nın 12 boyutlu özellik vektörü için elde edilmiştir. Sonuç olarak, EmoSTAR veritabanı için %97,5' bir başarı ortaya çıkmış ve duygu sınıflandırmasında DVM yönteminin K-EK yönteminden daha iyi olduğunu göstermiştir[20].

Zhalehpour ve ark. 2016 yılında yayınlanan çalışmalarında BAUM-1 veri setinde çalışmışlar ve sınıflandırma işlemi için DVM sınıflandırıcı kullanmışlardır. BAUM-1 a veri seti için 8 duygu ve zihinsel durum sınıflandırması sadece ses ile gerçekleştirildiğinde ortalama %63,53 tanıma oranına, sadece video ile gerçekleştirildiğinde ortalama %31,24 tanıma oranına, hem ses hem de video ile gerçekleştirildiğinde ortalama %65,84 tanıma oranına ulaşılmıştır. 5 duygu ile yapılan çalışmalarda sadece ses duygusu sınıflandırması %71,71 oranında olmuştur. Kullanılan modelin doğruluk oranı eNTERFACE veri setinde

ise sadece ses için %72,95 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte BAUM-1 s veri setinde elde edilen doğruluk oranlarının BAUM-1 a veri setinde elde edilen sonuçlardan çok daha düşük olduğu görülmüştür [89].

Bakır ve Yuzkat 2018 yılında yayınladıkları çalışmada, Türkçe ses formları ve özelliklerin dikkate alındığı hibrit bir model kullanarak otomatik KDT sistemi geliştirmişlerdir. Çalışma için 25 erkek ve 25 kadından yaklaşık 3000 farklı uzunluktaki kelime ve cümle Türkçe ses örneği toplanmış ve özgün bir Türkçe veri seti oluşturulmuştur. Ses örneklerinin özellikleri MFKK ve *Mel Frequency Discrete Wavelet Coefficients (MFDWC)* kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca modelin ilk aşamasında bu ses örneklerinin spektral özellik vektörleri DVM kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen özellik vektörleri, GKM, YSA, Dinamik Zaman Bükme-DZM (*Dynamic Time Warping-DTW*), GKM ve DVM hibrit modelleri ile eğitilmiştir. Hibrit model, DVM ve GMM ile birleştirilerek uygulanmıştır. Sonuçlar dikkate alındığında hibrit model diğer konuşma duygu tanıma yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir [90].

Canpolat ve ark. 2020 yılında yayınlanan çalışmalarında Türkçe dilinde “Türkçe Ses-Duygu Veri Seti (TurEV-DB)” olarak isimlendirdikleri veri setinin geliştirilmesini açıklamışlardır. Veri setinde KZFD spektrogram resimleri, seçilmiş Türkçe kelimelerden oluşan ses dosyaları ve openSMILE ile elde edilen özellikler de yer almaktadır. TurEV-DB veri seti 408 adeti sakin (nötr), 487 adeti sinirli, 483 adeti üzgün, 357 adeti mutlu olmak üzere dört farklı duygu durumu barındırmaktadır. Bu dört duygu tipinin (kızgın, sakin, mutlu ve üzgün) üç farklı frekans bandında bir kelimelik seslendirmeleri yer almaktadır. Çalışmalarında bu üç farklı frekans bandında uyguladıkları ESA ve DVM yöntemlerinin kullanıldığı KDT modelini de sunmuşlardır. Model, TurEV kullanılarak eğitilmiş ve doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar, modelin duygu tanımda kullanılabilir bir yapıya sahip olduğuna işaret etmektedir [91].

Bir diğer çalışmada Özsoğmez ve ark. Türkçe TurES ve TurEV-DB veri setlerini kullanarak duygu sınıflandırma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Veri setleri üzerinde özellik çıkarımı için MFKK, Göreceli Spektra-(PLP-RASTA), DTK, Mel Spektrogram yöntemlerini kullanmışlardır. Temel bileşenler analizi yöntemi ile özellik seçimi yapılmış, sınıflandırma ise derin öğrenme modelleri ile gerçekleştirmişlerdir. En iyi sonuç TurEV-DB veri seti üzerinde bütün özellik tiplerinin kullanıldığı; 100 nöron, 1 ara katman, Uyarlanabilir Moment (*Adaptive Moment*)-ADAM optimize edici ve 80 döngü parametresi ile oluşturulan %92,2 doğruluk oranına sahip modele aittir. TurES veri seti üzerinde de Sentetik Azınlık Aşırı-Örnekleme (SMOTE) ve Temel Bileşenler Analizi işlemlerinin uygulandığı ve 250 nöronlu, 2 ara katmanlı Stokastik Gradyan İniş (*Stochastic Gradient Descent*)-SGD optimize edici ve 80 döngülü model oluşturulduğunda önceki çalışmalardan daha yüksek olarak %85,5 ortalama doğruluk oranı elde edilmiştir [92].

Yukarıda açıklanan çalışmalara ait kullanılan veri setleri, özellikler, sınıflandırıcı yöntemleri ve elde edilen sonuçların listesi Tablo 5’ te özet halinde sunulmuştur

Tablo 5. Türkçe veri setleri ile yapılan çalışmaların listesi

| Makale Başlığı | Kullanılan Veri seti(leri) | Özellikler | Sınıflandırıcı | Sonuçlar |
|---|----------------------------|---|----------------|---|
| Recognizing emotion from Turkish speech using acoustic features (2013) [83] | TurES, VAM | openSmile tarafından çıkarılan düşük seviyeli tanımlayıcı özellikler: temel frekans (F0), ses yüksekliği, seslendirme olasılığı, 0-14 MFKK, Mel frekans bantlarının 0 ila 7 logaritmik gücü (logMelFreqBand), 8 DTK katsayısından | DVM, Bayes Ağı | DVM sınıflandırıcı ile ağırlıklı ortalama duyarlılık: %57,5 ağırlıksız ortalama duyarlılık: %43,3 Bayes Ağı sınıflandırıcı ile ağırlıklı ortalama duyarlılık: %51,8 ağırlıksız ortalama duyarlılık: %45,5 |

| | | | | |
|--|--|---|---|---|
| | | (IspFreq) hesaplanan 0 ila 7 satır spektral çift frekansları ve ses kalitesi (parlaklık-shimmer ve jitter-titre) | | |
| A Turkish audio-visual emotional database (2013) [54] | BAUM-1, eINTERFACE | MFKK ve algısal doğrusal kestirime dayalı göreceli spektral katsayıları (RASTA-PLP). MFKK için 12, RASTA-PLP için 13 katsayı | DVM | BAUM-1 a veri seti için %71 doğruluk, eINTERFACE veri seti için %73 |
| Protocol And Baseline For Experiments On Bogazici University Turkish Emotional Speech Corpus (2014) [86] | BÜ/EE (Boğaziçi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği) Duygulu Konuşma Veritabanı | openSmile tarafından çıkarılan düşük seviyeli tanımlayıcı özellikler: (bazıları) temel frekans (F0), MFKK, enerji | DVM, Rastal Ormanlar (RO) | DVM %64,20, RO %52,27 doğruluk |
| A cross-corpus experiment in speech emotion recognition (2014) [87] | EmoSTAR, Berlin Emo-DB | openSmile ile elde edilen konfigürasyonlardaki özellik sayıları -Emobase.conf dosyası : 988 (26 LLD + 26 delta)*19 fonksiyon -Emo_large.conf dosyası: 6669 (57 LLD + 57 delta+ 57 delta-delta)*39 fonksiyon | (Weka ile uygulanan) Naive Bayes (NB), SMO ve Bagging (Bag) | 4 duygu için (kızgın, mutlu, nötr, üzgün) en yüksek başarımlar: Berlin Emo-DB veriseti için emobase.conf özellikleri ile SMO sınıflandırıcıda %92,33, EmoSTAR veriseti için emo_large.conf özellikler ile SMO sınıflandırıcıda %96,94 |
| Binary classification performances of emotion classes for Turkish Emotional Speech (2015) [88] | TurES | openSmile ile elde edilen Emo_large.conf dosyası: 6669 öznelik. Bazı akustik özellikler: [0-12] mel frekansı kepstum katsayısı, temel frekans (F0) ve zarfı, seslilik olasılığı, logaritmik | DVM, Bayes Ağı, Karar Ağaçları | İkili duygu çiftlerinin sınıflandırmasında kızgın-üzgün için ağırlıksız doğruluk DVM ile %76, Bayes Ağı ile %79, Karar Ağacı (J48) ile %70 |

| | | | | |
|---|--|--|-----------|---|
| | | enerji, sıfır geçiş oranı | | |
| Emotion recognition from speech signal using mel-frequency cepstral coefficients (2015) [20] | EmoSTAR | MFKK | DVM, K-EK | 12 boyutlu MFFK vektörü için DVM ile %97,5, K-EK için %93,3 doğruluk |
| BAUM-1: A spontaneous audio-visual face database of affective and mental states (2016) [89] | BAUM-1, eINTERFACE | MFKK ve algısal doğrusal kestirime dayalı göreceli spektral katsayıları (RASTA-PLP). MFKK için 12, RASTA-PLP için 13 katsayı | DVM | Sadece ses için: eINTERFACE veri setinde 6 duygu ile %72,95 doğruluk, BAUM-1a veri setinde 5 duygu ile %71,71 doğruluk |
| Speech emotion classification and recognition with different methods for Turkish language (2018) [90] | 5 duygu (kızgın, korku, üzgün, mutlu, nötr) için yaklaşık 3000 kayıt barındıran özgün bir veri seti. | MFDWC, MFKK, DÖKK | DVM, GKM | Doğrusal çekirdek fonksiyonu ile erkek kayıtlar için %76,78 kadın kayıtlar için %79,85. Polinom çekirdek fonksiyonu ile erkek kayıtlar için %80,67, kadın kayıtlar için %81,37 doğruluk |
| Turkish Emotion Voice Database (TurEV-DB) (2020) [91] | TurEV-DB | openSmile ile elde edilen özellikler: (bazıları) F0, seslendirme olasılığı ve ses yüksekliği | ESA, DVM | 0-8000 HZ frekans bandında Örn: Kızgın duygusu için, 0,84 kesinlik, 0,76 duyarlılık, 0,80 F1 skor |
| Optimal Classifier Selection in Turkish Speech Emotion Detection (2021) [92] | TurES, TurEV-DB | MFKK, PLP-RASTA, DTK, Mel-Spektrogram, | YSA | TurEV-DB veri setinde %92,2 doğruluk, TurES veri setinde %92,2 doğruluk |

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (DISCUSSION AND CONCLUSIONS)

Bu çalışma derin öğrenme mimarileri kullanılarak gerçekleştirilmiş konuşmadan duygu tanıma uygulamalarını kapsayacak nitelikte hazırlanmıştır. Derin öğrenme uygulamalarının pek çok araştırma alanına dahil olmasıyla birlikte elde ettiği popülerlik KDT sistemlerine de yansımış ve bu literatür araştırması çalışmasının motivasyon kaynağı olmuştur. Bununla birlikte diğer çalışmalardan farklı olarak

Türkçe veri setleri ile yapılmış çalışmalar ayrı bir bölüm olarak incelenmiştir. Farklı veri setleri üzerinden denenmiş yine farklı modellerden elde edilen sonuçlar sunulmuş ve bu yönüyle KDT alanında araştırmalar ve uygulamalar gerçekleştirecek araştırmacılara katkı sunması hedeflenmiştir.

KDT ses işleme ile ilgili bir çalışma alanı olmakla birlikte insan konuşmasının işlenmesinin yanı sıra duygu ve duygunun ifadesinin ses üzerinden elde edilmesi amacı ile ortaya çıkan ek zorluklara sahiptir. Çünkü konuşmada olduğu gibi duyuların ifadesinde de kültüre ve dile dayalı etkiler vardır. KDT uygulamalarının zorlu yönlerinden bir diğeri ise gerçek hayat uygulamalarına uyarlanmasıdır. Bunun sebeplerinden birisi ise veri setlerinde yer alan kayıtların genellikle profesyonel veya amatör aktörlerin gerçekleştirdiği performanslardan elde edilmesi ve dil çeşitliliğinin az olmasıdır. KDT sistemlerinin gerçek hayat uygulamalarında ve gerçek zamanlı olarak yer alması sürecine aktörlük yapılmadan, doğal ve gürültülü ortamlardan elde edilen ve dillere ait farklı şivelerin kayıtlarından oluşan veri seti sayısının artırılması katkı sunacaktır.

KDT uygulamalarında özellik çıkarma ve duygunun sınıflandırılması aşamalarında kabul görmüş bir yöntem olmamakla birlikte son yıllarda derin öğrenme modelleri ile gerçekleştirilen uygulamalarda bir artış olduğu görülmüştür. Derin öğrenme modellerinin uygulandığı çalışmalarda ham konuşma dalga formunu [49,74, 78], spektrogram [75,76,79,91] veya log-mel spektrogramları [49,70] gibi farklı girdi türleri kullanılmıştır. Tablo 6'da derin öğrenme modellerinin kullanıldığı KDT uygulamalarında elde edilen sonuçların test edildikleri veri seti bazında gruplandırılması yer almaktadır. Burada özellikle TSA mimarilerinin ve ESA modellerinin sık uygulanan yöntemler olduğu bununla birlikte dikkat mekanizmasına dayalı olarak geliştirilen modellerde de başarı oranlarının %80'lerin üzerine çıktığı görülmüştür [49,50,72].

Ayrıca geliştirilen modeller farklı veri setlerinde test edildiğinde duygunun sınıflandırmasında farklı doğruluklar ortaya çıkmış ve bir veri setinde elde edilen yüksek doğruluk oranına farklı bir veri setinde ulaşamadığı görülmüştür. Örneğin [49]'da yapılan çalışmada kullanılan model Berlin Emo-DB veri setinde IEMOCAP veri setinden daha yüksek doğruluk oranı elde etmiştir. Yine tespiti yapılabilecek bir diğer durum ise konuşmacıya bağlı ve konuşmacıdan bağımsız yapılan deneylerde konuşmacıya bağlı deneylerin performansının daha iyi olduğudur. Bu durumda ESA, UKSB modellerinin bir arada kullanılması daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Tablo 6. Çalışmaların veri seti bazında gruplandırılması

| Veri seti | Çalışma | Kullanılan Model | Sonuçlar |
|---------------|---------|------------------|---|
| IEMOCAP | [49] | 2B ESA-UKSB | Konuşmacıya bağlı deneylerde %89,16, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %52,14 doğruluk |
| | [70] | ADRNN | Konuşmacıya bağlı deneylerde %74,96, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %69,32 doğruluk |
| | [72] | ESA, İY-UKSB | %80,1 ağırlıksız doğruluk oranı |
| | [73] | 1B ESA | %64,3 doğruluk |
| | [74] | EUKSB | %75 doğruluk |
| | [75] | İY-UKSB | %72,25 doğruluk |
| | [76] | ESA | %77,01 doğruluk |
| | [77] | UKSB - YÖD | %61,20 ağırlıklı doğruluk, %54,99 ağırlıksız doğruluk |
| | [78] | 1B GESA | %73 duyarlılık |
| | [79] | DÖA | AHSN olarak isimlendirilen kısımda %65,61 , 40db gürültülü örneklerde 65,90 ağırlıklı ortalama recall oranı, AESN olarak isimlendirilen kısımda temiz konuşma örneklerinde %62,99, 40db gürültülü örneklerde %62,81 ağırlıklı ortalama recall oranı |
| Berlin Emo-DB | [49] | 2B ESA-UKSB | Konuşmacıya bağlı deneylerde %95,33, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %95,89 |

| | | | |
|-----------|------|--|---|
| | [70] | ADRNN | Konuşmacıya bağlı deneylerde %90,78, konuşmacıdan bağımsız deneylerde %85,39 doğruluk |
| | [73] | 1B ESA | 535 örnekle 7 duygu sınıfı için %86,1 520 örnekle uygulamada %95,71 doğruluk |
| | [75] | İY-UKSB | %85,52 |
| | [76] | ESA | %92,02 ağırlıksız doğruluk oranı |
| | [77] | UKSB - YÖD | %85,95 ağırlıklı doğruluk oranı, %82,6 ağırlıksız doğruluk oranı |
| | [78] | 1B GESA | %90 duyarlılık |
| RAVDESS | [69] | UKSB | %68,8 doğruluk |
| | [73] | 1B ESA | %71,61 doğruluk |
| | [74] | EUKSB | %80 doğruluk |
| | [75] | İY-UKSB | %77,02 doğruluk |
| RML | [69] | UKSB | %70,35 doğruluk |
| | [39] | Özellik seçiminde OK, sınıflandırma için DVM | %74,07 doğruluk |
| SAVEE | [69] | UKSB | %72,13 doğruluk |
| CASIA | | | %92,8 ağırlıksız ortalama duyarlılık |
| eNTERFACE | [71] | UKSB | %89,6 UAR |
| GEMEP | | | %57,0 UAR |
| AFEW 5.0 | | | %35,77 doğruluk |
| BAUM-1 s | [80] | DVM | %44,06 doğruluk |

Bir diğer yandan Türkçe veri setlerinin kullanıldığı çalışmalar son zamanlarda artış gösterse de yaygın kullanılan veri setleri ile kıyaslandığında hala yeterli düzeyde olmadığı söylenebilir. Bu alanda yapılacak çalışmaların sayısının artmasına Türkçe veri setlerine erişim imkanının Berlin Emo-DB, RAVDESS gibi veri setleri kadar kolay olması katkı sunabilir. İleriye dönük olarak yapılacak çalışmalarda ise konuşmaya ait özellikleri ve duygu sınıflandırma için kullanılan modelleri çeşitlendirmek ve hibrit modeller üretmek, modelin başarımı için Türkçe veri setleri arasında çapraz uygulamalar gerçekleştirmek Türkçe dili için KDT uygulamalarını güçlendirecektir.

Sonuç olarak, KDT uzun yıllardır araştırmalar gerçekleştirilen bir alan olmuştur. Uygulamaları eğitim, güvenlik, sağlık, pazarlama, IoT, sanal gerçeklik gibi birçok alanda hayatımızda yer alabilecek ve potansiyeli hala keşfetmeye açık güncel bir araştırma alanı olmaya da devam etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duygu kelimesinin tanımı. Türk Dil Kurumu TDK, <https://sozluk.gov.tr/> Erişim tarihi: 20/03/2022
- [2] Sibel, S. Ü. (2013). Örgütlerde duygusal zeka. Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 16(29), 213-242.
- [3] Liu, B. (2012). Sentiment analysis and opinion mining. Synthesis lectures on human language technologies, 5(1), 1-167.
- [4] Li, X., & Lin, R. (2021, December). Speech Emotion Recognition for Power Customer Service. In 2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC) (pp. 514-518). IEEE.
- [5] Simcock, G., McLoughlin, L. T., De Regt, T., Broadhouse, K. M., Beaudequin, D., Lagopoulos, J., & Hermens, D. F. (2020). Associations between facial emotion recognition and mental health in early adolescence. International journal of environmental research and public health, 17(1), 330.

- [6] Saste, S. T., & Jagdale, S. M. (2017, April). Emotion recognition from speech using MFCC and DWT for security system. In 2017 international conference of electronics, communication and aerospace technology (ICECA) (Vol. 1, pp. 701-704). IEEE
- [7] Yang, D., Alsadoon, A., Prasad, P. C., Singh, A. K., & Elchouemi, A. (2018). An emotion recognition model based on facial recognition in virtual learning environment. *Procedia Computer Science*, 125, 2-10.
- [8] Er, M. B., & Harun, Ç. İ. Ğ. (2020). Türk Müziği Uyarınları Kullanılarak İnsan Duygularının Makine Öğrenmesi Yöntemi İle Tanınması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 8(2), 458-474
- [9] Soleymani, M., Garcia, D., Jou, B., Schuller, B., Chang, S. F., & Pantic, M. (2017). A survey of multimodal sentiment analysis. *Image and Vision Computing*, 65, 3-14
- [10] Nasukawa, T., & Yi, J. (2003, October). Sentiment analysis: Capturing favorability using natural language processing. In *Proceedings of the 2nd international conference on Knowledge capture* (pp. 70-77).
- [11] Rhanoui, M., Mikram, M., Yousfi, S., & Barzali, S. (2019). A CNN-BiLSTM Model for Document-Level Sentiment Analysis. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 1(3), 832-847.
- [12] Cowie, R., Douglas-Cowie, E., Tsapatsoulis, N., Votsis, G., Kollias, S., Fellenz, W., & Taylor, J. G. (2001). Emotion recognition in human-computer interaction. *IEEE Signal processing magazine*, 18(1), 32-80.
- [13] Busso, C., Lee, S., & Narayanan, S. (2009). Analysis of emotionally salient aspects of fundamental frequency for emotion detection. *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, 17(4), 582-596.]
- [14] Wu, S., Falk, T. H., & Chan, W. Y. (2011). Automatic speech emotion recognition using modulation spectral features. *Speech communication*, 53(5), 768-785.
- [15] Jayalekshmi, J., & Mathew, T. (2017, July). Facial expression recognition and emotion classification system for sentiment analysis. In 2017 International Conference on Networks & Advances in Computational Technologies (NetACT) (pp. 1-8). IEEE.
- [16] Wu, T., Peng, J., Zhang, W., Zhang, H., Tan, S., Yi, F., ... & Huang, Y. (2022). Video sentiment analysis with bimodal information-augmented multi-head attention. *Knowledge-Based Systems*, 235, 107676.
- [17] Zadeh, A. (2015). Micro-opinion Sentiment Intensity Analysis and Summarization in Online Videos. In *Proceedings of the 2015 ACM on International Conference on Multimodal Interaction (ICMI '15)*.
- [18] Zadeh, A., Chen, M., Poria, S., Cambria, E., & Morency, L. P. (2017). Tensor fusion network for multimodal sentiment analysis. *arXiv preprint arXiv:1707.07250*.
- [19] Koolagudi, S. G., Kumar, N., & Rao, K. S. (2011, February). Speech emotion recognition using segmental level prosodic analysis. In 2011 international conference on devices and communications (ICDeCom) (pp. 1-5). IEEE
- [20] Korkmaz, O. E., & Atasoy, A. (2015, November). Emotion recognition from speech signal using mel-frequency cepstral coefficients. In 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (pp. 1254-1257). IEEE.
- [21] Ingale, A. B., & Chaudhari, D. S. (2012). Speech emotion recognition. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 2(1), 235-238.
- [22] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.



- [23] Zhao, Z. Q., Zheng, P., Xu, S. T., & Wu, X. (2019). Object detection with deep learning: A review. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 30(11), 3212-3232.
- [24] Young, T., Hazarika, D., Poria, S., & Cambria, E. (2018). Recent trends in deep learning based natural language processing. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 13(3), 55-75.
- [25] Liang, H., Sun, X., Sun, Y., & Gao, Y. (2017). Text feature extraction based on deep learning: a review. *EURASIP journal on wireless communications and networking*, 2017(1), 1-12.
- [26] Yao, K., Yu, D., Seide, F., Su, H., Deng, L., & Gong, Y. (2012, December). Adaptation of context-dependent deep neural networks for automatic speech recognition. In *2012 IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT)* (pp. 366-369). IEEE.
- [27] Aravindpai Pai, "CNN vs. RNN vs. ANN – Analyzing 3 Types of Neural Networks in Deep Learning" <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2020/02/cnn-vs-rnn-vs-mlp-analyzing-3-types-of-neural-networks-in-deep-learning/> Erişim Tarihi: 21/02/2022
- [28] Khalil, R. A., Jones, E., Babar, M. I., Jan, T., Zafar, M. H., & Alhussain, T. (2019). Speech emotion recognition using deep learning techniques: A review. *IEEE Access*, 7, 117327-117345.
- [29] Akçay, M. B., & Oğuz, K. (2020). Speech emotion recognition: Emotional models, databases, features, preprocessing methods, supporting modalities, and classifiers. *Speech Communication*, 116, 56-76.
- [30] El Ayadi, M., Kamel, M. S., & Karray, F. (2011). Survey on speech emotion recognition: Features, classification schemes, and databases. *Pattern recognition*, 44(3), 572-587.
- [31] Eyben, F., Wöllmer, M., & Schuller, B. (2010, October). Opensmile: the munich versatile and fast open-source audio feature extractor. In *Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia* (pp. 1459-1462).
- [32] Boersma, P. & Weenink, D. (1992–2022):Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. <https://www.fon.hum.uva.nl/paul/praat.html> Erişim tarihi: 20/05/2022
- [33] Chen, S., Jin, Q., Li, X., Yang, G., & Xu, J. (2014, September). Speech emotion classification using acoustic features. In *The 9th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing* (pp. 579-583). IEEE.
- [34] Jacob, A. (2016, April). Speech emotion recognition based on minimal voice quality features. In *2016 International conference on communication and signal processing (ICCSP)* (pp. 0886-0890). IEEE.
- [35] Zhou, Y., Sun, Y., Zhang, J., & Yan, Y. (2009, December). Speech emotion recognition using both spectral and prosodic features. In *2009 international conference on information engineering and computer science* (pp. 1-4). IEEE.
- [36] Wang, Y., Du, S., & Zhan, Y. (2008, October). Adaptive and optimal classification of speech emotion recognition. In *2008 fourth international conference on natural computation* (Vol. 5, pp. 407-411). IEEE.
- [37] Rao, K. S., Koolagudi, S. G., & Vempada, R. R. (2013). Emotion recognition from speech using global and local prosodic features. *International journal of speech technology*, 16(2), 143-160.
- [38] Li, X., Tao, J., Johnson, M. T., Soltis, J., Savage, A., Leong, K. M., & Newman, J. D. (2007, April). Stress and emotion classification using jitter and shimmer features. In *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07* (Vol. 4, pp. IV-1081). IEEE.
- [39] Aouani, H., & Ayed, Y. B. (2020). Speech emotion recognition with deep learning. *Procedia Computer Science*, 176, 251-260.
- [40] Pathak, S., & Kulkarni, A. (2011, April). Recognizing emotions from speech. In *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology* (Vol. 4, pp. 107-109). IEEE.

- [41] Nwe, T. L., Foo, S. W., & De Silva, L. C. (2003). Speech emotion recognition using hidden Markov models. *Speech communication*, 41(4), 603-623.
- [42] Jiang, P., Fu, H., Tao, H., Lei, P., & Zhao, L. (2019). Parallelized convolutional recurrent neural network with spectral features for speech emotion recognition. *IEEE Access*, 7, 90368-90377.
- [43] Jain, M., Narayan, S., Balaji, P., Bhowmick, A., & Muthu, R. K. (2020). Speech emotion recognition using support vector machine. *arXiv preprint arXiv:2002.07590*.
- [44] Zhou, G., Hansen, J. H., & Kaiser, J. F. (2001). Nonlinear feature based classification of speech under stress. *IEEE Transactions on speech and audio processing*, 9(3), 201-216.
- [45] Bandela, S. R., & Kumar, T. K. (2017, July). Stressed speech emotion recognition using feature fusion of teager energy operator and MFCC. In *2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1-5). IEEE.
- [46] Mairesse, F., Polifroni, J., & Di Fabbrizio, G. (2012, March). Can prosody inform sentiment analysis? experiments on short spoken reviews. In *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 5093-5096). IEEE.
- [47] Shen, Q., Wang, Z., & Sun, Y. (2017, October). Sentiment analysis of movie reviews based on cnn-blstm. In *International Conference on Intelligence Science* (pp. 164-171). Springer, Cham.
- [48] Rosas, V. P., Mihalcea, R., & Morency, L. P. (2013). Multimodal sentiment analysis of spanish online videos. *IEEE Intelligent Systems*, 28(3), 38-45.
- [49] Zhao, J., Mao, X., & Chen, L. (2019). Speech emotion recognition using deep 1D & 2D CNN LSTM networks. *Biomedical signal processing and control*, 47, 312-323.
- [50] Burkhardt, F., Paeschke, A., Rolfes, M., Sendlmeier, W. F., & Weiss, B. (2005, September). A database of German emotional speech. In *Interspeech* (Vol. 5, pp. 1517-1520).
- [51] Haq, S. U. (2011). Audio visual expressed emotion classification. University of Surrey (United Kingdom).
- [52] Livingstone, S. R., & Russo, F. A. (2018). The Ryerson Audio-Visual Database of Emotional Speech and Song (RAVDESS): A dynamic, multimodal set of facial and vocal expressions in North American English. *PloS one*, 13(5), e0196391.
- [53] Dhall, A., Ramana Murthy, O. V., Goecke, R., Joshi, J., & Gedeon, T. (2015, November). Video and image based emotion recognition challenges in the wild: Emotiw 2015. In *Proceedings of the 2015 ACM on international conference on multimodal interaction* (pp. 423-426).
- [54] Önder, O., Zhalehpour, S., & Erdem, Ç. E. (2013, April). A Turkish audio-visual emotional database. In *2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
- [55] Busso, C., Bulut, M., Lee, C. C., Kazemzadeh, A., Mower, E., Kim, S., Chang, J., N., Lee, S. & Narayanan, S. S. (2008). IEMOCAP: Interactive emotional dyadic motion capture database. *Language resources and evaluation*, 42(4), 335-359.
- [56] Cao, H., Cooper, D. G., Keutmann, M. K., Gur, R. C., Nenkova, A., & Verma, R. (2014). Crema-d: Crowd-sourced emotional multimodal actors dataset. *IEEE transactions on affective computing*, 5(4), 377-390.
- [57] Martin, O., Kotsia, I., Macq, B., & Pitas, I. (2006, April). The eNTERFACE'05 audio-visual emotion database. In *22nd International Conference on Data Engineering Workshops (ICDEW'06)* (pp. 8-8). IEEE.
- [58] China Linguistic Data Consortium <http://www.chineseldc.org> Erişim Tarihi: 25/03/2022

- [59] Bänziger, T., Pirker, H., & Scherer, K. (2006, May). GEMEP-Geneva Multimodal Emotion Portrayals: A corpus for the study of multimodal emotional expressions. In Proceedings of LREC (Vol. 6, pp. 15-019).
- [60] Wang, Y., & Guan, L. (2005, March). Recognizing human emotion from audiovisual information. In Proceedings.(ICASSP'05). IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2005. (Vol. 2, pp. ii-1125). IEEE.
- [61] Latif, S., Qayyum, A., Usman, M., & Qadir, J. (2018, December). Cross lingual speech emotion recognition: Urdu vs. western languages. In 2018 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT) (pp. 88-93). IEEE.
- [62] Costantini, G., Iaderola, I., Paoloni, A., & Todisco, M. (2014). EMOVO corpus: an Italian emotional speech database. In International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2014) (pp. 3501-3504). European Language Resources Association (ELRA).
- [63] Wani, T. M., Gunawan, T. S., Qadri, S. A. A., Kartiwi, M., & Ambikairajah, E. (2021). A comprehensive review of speech emotion recognition systems. IEEE Access, 9, 47795-47814.
- [64] Wang, X., Chen, X., & Cao, C. (2020). Human emotion recognition by optimally fusing facial expression and speech feature. Signal Processing: Image Communication, 84, 115831.
- [65] Zehra, W., Javed, A. R., Jalil, Z., Khan, H. U., & Gadekallu, T. R. (2021). Cross corpus multi-lingual speech emotion recognition using ensemble learning. Complex & Intelligent Systems, 7(4), 1845-1854
- [66] Demircan, S., & Kahramanli, H. (2018). Application of fuzzy C-means clustering algorithm to spectral features for emotion classification from speech. Neural Computing and Applications, 29(8), 59-66.
- [67] Ganapathy, A. (2016). Speech Emotion Recognition Using Deep Learning Techniques. ABC Journal of Advanced Research, 5(2), 113-122.
- [68] Abbaschian, B. J., Sierra-Sosa, D., & Elmaghraby, A. (2021). Deep learning techniques for speech emotion recognition, from databases to models. Sensors, 21(4), 1249.
- [69] Demir, A., Atila, O., & Şengür, A. (2019, September). Deep learning and audio based emotion recognition. In 2019 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) (pp. 1-6). IEEE.
- [70] Meng, H., Yan, T., Yuan, F., & Wei, H. (2019). Speech emotion recognition from 3D log-mel spectrograms with deep learning network. IEEE access, 7, 125868-125881.
- [71] Xie, Y., Liang, R., Liang, Z., Huang, C., Zou, C., & Schuller, B. (2019). Speech emotion classification using attention-based LSTM. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 27(11), 1675-1685.
- [72] Jalal, M. A., Milner, R., & Hain, T. (2020, October). Empirical Interpretation of Speech Emotion Perception with Attention Based Model for Speech Emotion Recognition. In INTERSPEECH (pp. 4113-4117).
- [73] Issa, D., Demirci, M. F., & Yazici, A. (2020). Speech emotion recognition with deep convolutional neural networks. Biomedical Signal Processing and Control, 59, 101894.
- [74] Mustaqeem, Kwon, S. (2020). CLSTM: Deep feature-based speech emotion recognition using the hierarchical ConvLSTM network. Mathematics, 8(12), 2133.
- [75] Mustaqeem, Sajjad, M., & Kwon, S. (2020). Clustering-based speech emotion recognition by incorporating learned features and deep BiLSTM. IEEE Access, 8, 79861-79875.
- [76] Anvarjon, T., Mustaqeem, & Kwon, S. (2020). Deep-net: A lightweight CNN-based speech emotion recognition system using deep frequency features. Sensors, 20(18), 5212.

- [77] Li, D., Liu, J., Yang, Z., Sun, L., & Wang, Z. (2021). Speech emotion recognition using recurrent neural networks with directional self-attention. *Expert Systems with Applications*, 173, 114683.
- [78] Mustaqeem, & Kwon, S. (2021). MLT-DNet: Speech emotion recognition using 1D dilated CNN based on multi-learning trick approach. *Expert Systems with Applications*, 167, 114177.
- [79] Yusuf, S. M., Adedokun, E. A., Muazu, M. B., Umoh, I. J., & Ibrahim, A. A. (2021, October). RMWSaug: Robust Multi-window Spectrogram Augmentation Approach for Deep Learning based Speech Emotion Recognition. In *2021 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)* (pp. 1-6). IEEE.
- [80] Zhang, S., Tao, X., Chuang, Y., & Zhao, X. (2021). Learning deep multimodal affective features for spontaneous speech emotion recognition. *Speech Communication*, 127, 73-81.
- [81] Oflazoglu, Ç., & Yildirim, S. (2011, April). Turkish emotional speech database. In *2011 IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1153-1156). IEEE.
- [82] Grimm, M., Kroschel, K., & Narayanan, S. (2008, June). The Vera am Mittag German audio-visual emotional speech database. In *2008 IEEE international conference on multimedia and expo* (pp. 865-868). IEEE.
- [83] Oflazoglu, C., & Yildirim, S. (2013). Recognizing emotion from Turkish speech using acoustic features. *EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing*, 2013(1), 1-11.
- [84] Eroglu Erdem, C., Turan, C., & Aydin, Z. (2015). BAUM-2: a multilingual audio-visual affective face database. *Multimedia tools and applications*, 74(18), 7429-7459.
- [85] Meral, H. M., Ekenel, H. K., & Ozsoy, A. (2003). Analysis of emotion in Turkish. In *XVII National Conference on Turkish Linguistics*.
- [86] Kaya, H., Salah, A. A., Gürgen, S. F., & Ekenel, H. (2014, April). Protocol and baseline for experiments on Bogazici University Turkish emotional speech corpus. In *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1698-1701). IEEE.
- [87] Parlak, C., Diri, B., & Gürgen, F. (2014, September). A cross-corpus experiment in speech emotion recognition. In *SLAM@ INTERSPEECH* (pp. 58-61).
- [88] Oflazoglu, Ç., & Yildirim, S. (2015, May). Binary classification performances of emotion classes for Turkish Emotional Speech. In *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 2353-2356). IEEE.
- [89] Zhalehpour, S., Onder, O., Akhtar, Z., & Erdem, C. E. (2016). BAUM-1: A spontaneous audio-visual face database of affective and mental states. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 8(3), 300-313.
- [90] Bakır, C., & Yuzkat, M. (2018). Speech emotion classification and recognition with different methods for Turkish language. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(2), 122-128.
- [91] Canpolat, S. F., Ormanoğlu, Z., & Zeyrek, D. (2020, May). Turkish Emotion Voice Database (TurEV-DB). In *Proceedings of the 1st Joint Workshop on Spoken Language Technologies for Under-Resourced Languages (SLTU) and Collaboration and Computing for Under-Resourced Languages (CCURL)* (pp. 368-375).
- [92] Özsönmez, D. B., Acarman, T., & Parlak, İ. B. (2021, June). Optimal Classifier Selection in Turkish Speech Emotion Detection. In *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.

A Conceptual Design Application with a Systematic Approach: Disabled-Friendly Gym Equipment

Abdullah ÇELİK^{1,*}  C. Oktay AZELOĞLU¹ 

¹Yıldız Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, 34349-Besiktas / ISTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 28.04.2022
Revision: 25.05.2022
Accepted: 26.05.2022

Highlights

- Application of systematic design approach
- Conceptual design of a disabled-friendly gym equipment

Keywords

Systematic Design Approach,
Conceptual Design,
Disabled Oriented Design,
Gym Equipment.

In this study, gym equipment suitable for the disabled was designed conceptually with the systematic approach of Pahl and Beitz. Figure A displays the conceptual design.

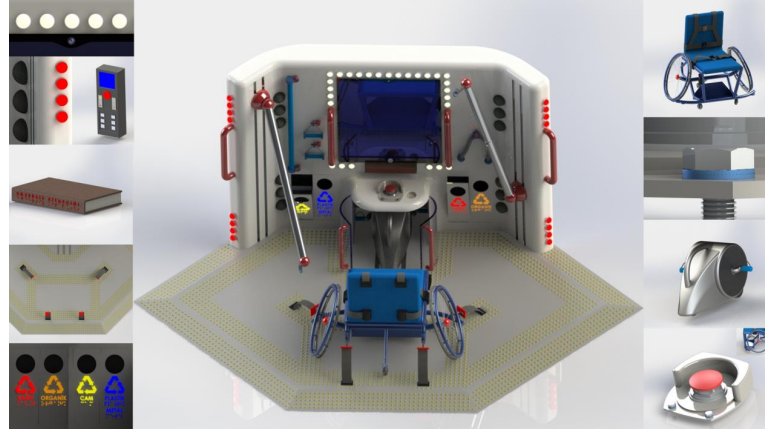


Figure A. Conceptual design of the disabled-friendly gym equipment

Purpose: A design that eases the availability of each gym equipment by disabled people has been intended after collecting various sports equipment in one place. Moreover, it is aimed at a system containing some inventions and safety precautions that do not exist in current systems by taking care of the sensitivity of the disabled.

Theory and Methods: For the systematical design, the task was clarified, and the requirements list was set up. Then, abstracting was made to identify the essential problems, and the function structures were established. Later, solution principles for sub-functions were identified, and a suitable working structure was selected. Solution variants were determined. Then, variants of conceptual design were evaluated against technical and economic criteria.

Results: As a consequence of combining the solutions for various functions of gym equipment, sixteen solution variants were determined. After technical and economic evaluation, the solution variant with the highest score was chosen among the solution variants.

Conclusion: In this study, the conceptual design of new multi-functional gym equipment suitable for disabled individuals has been made. For this purpose, the gym equipment makes it easier for the disabled to access different gym equipment by bringing them together was designed. The offered design, as a disabled-friendly multi-functional sports device, facilitates exercise and provides physical therapy. The study shows that the methodical use of the principles of the systematic design approach makes it easier to reach the most appropriate solution idea.



A Conceptual Design Application with a Systematic Approach: Disabled-Friendly Gym Equipment

Abdullah ÇELİK^{1,*} C. Oktay AZELOĞLU¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349-Besiktas / İSTANBUL

Abstract

Today, studies have been conducted in many fields so that disabled individuals can improve their quality of life and benefit from opportunities equally. One of these areas is sports activities. Disabled-friendly systems should be designed so that the disabled can do sports. In this study, the conceptual design of new sports equipment suitable for the disabled has been made. For this aim, a design that facilitates the availability of each single sports equipment by disabled individuals has been intended after gathering different types of sports equipment in one single place. Besides, this system includes some innovations and security measures that do not exist in present systems by taking care of the sensitivity of the disabled as well. Pahl and Beitz's systematic design approach was used as a method in the study. The improved sports equipment might be used both for sports and physical treatment by disabled individuals so that they could make the movements related to many muscle groups easily, and it might serve at home, in gyms, and physical treatment centers as well.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 28.04.2022
Düzeltilme: 25.05.2022
Kabul: 26.05.2022

Keywords

Systematic Design Approach, Conceptual Design, Disabled Oriented Design, Gym Equipment.

Anahtar Kelimeler

Sistematik Tasarım Yaklaşımı, Konsept Tasarım, Engellilere Yönelik Tasarım, Spor Aleti.

Sistematik Yaklaşımla Bir Konsept Tasarım Uygulaması: Engelli Dostu Spor Aleti

Öz

Günümüzde engelli bireylerin yaşam kalitesinin artırılması, fırsat ve imkânlardan eşit şekilde yararlanması için pek çok alanda çalışmalar yürütülmektedir. Bu alanlardan biri de spor faaliyetleridir. Engellilerin spor yapabilmesi için engelli dostu sistemler tasarlanmalıdır. Bu çalışmada, engelli bireylerin kullanımına uygun çok fonksiyonlu yeni bir spor aletinin konsept tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla, farklı spor aletlerini bir tek yerde toplayarak engellilerin her bir spor aletine ulaşımını kolaylaştıran bir tasarım hedeflenmiştir. Ayrıca, bu sistem engellilerin hassasiyetleri de gözetilerek mevcut sistemlerde olmayan yenilikler ve güvenlik önlemleri içermektedir. Çalışmada yöntem olarak Pahl ve Beitz'in sistemlik tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. Geliştirilen spor aleti, engelli bireylerin birçok kas grubuyla ilgili hareketleri kolaylıkla yapabilmelerini sağlayarak hem spor hem de fizik tedavi amacıyla kullanılabilir, ayrıca gerek evlerde gerek spor tesislerinde gerekse de fizik tedavi merkezlerinde hizmet sağlayabilecektir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun yaklaşık dörtte biri doğrudan çeşitli engellere sahip veya dolaylı olarak bireylerin engel türlerinden etkilenmektedir [1]. Engelli bireyler kendi fiziksel ve duygusal eksiklerinin yanında normal hayatın içinde karşılaştıkları sorunlarına ek olarak bir de başka engellerle de mücadele etmek zorunda kalırlar ve bu sebeple daha düşük bir yaşam kalitesine sahiptirler [2]. Sosyal devlet olmanın gereği olarak bedensel, zihinsel, görme ve işitme engelli bireylerin eşit imkanlara sahip olması, her türlü ihtiyaçlarının karşılanması ve üretken bir toplumda yer almaları gerekmektedir. Bir toplumun gelişmişlik seviyesi engelli bireylere verdiği değerle ölçülebileceği gibi onlara gerekli imkanları sunmak toplumu oluşturan her bir bireyin asli görevidir. Şüphesiz engelli bireyler için rehabilitasyonun ve sosyal entegrasyonun bir parçası olan spor ve fiziksel aktivite son derece ehemmiyetlidir. Nitekim Antik çağlardan beri fiziksel hareketlilik

rehabilitasyon amaçlı kullanılmaktadır [3]. Spor yapmak toplumdaki en hareketsiz topluluk olan engellilerin yalnızlığını ve diğer insanların ayırıcı davranışlarını azaltırken sosyal statülerini artırır [4]. Egzersiz ve spor yapan engelli bireylerin yaptıkları spor sonrası oluşan yorgunluğun ve hareket sebebiyle oluşan hormonların getirdiği mutluluğun uyku sorunlarını çözdüğü, öfke kontrolü sağladığı, aile içi ilişkilerini olumlu yönde etkilediği, arkadaşlık kurmayı kolaylaştırdığı ve bireyin sosyalleşmesine önemli derecede katkı sağladığı görülmüştür [5,6].

Spor bazıları için yalnızca boş zaman aktivitesi iken, bazı insanlar için bunun ötesindedir. Spor ayrıca engelli bireylerin sosyalleşmesini sağlamanın yanında aynı zamanda kendilerini kanıtlayarak bir adım öteye gidebilecekleri bir alan olarak da farklı bir anlam kazanır [7]. Engellilerin ihtiyaçlarını karşılama, bu önemli durumun farkındalığını artırmaya yönelik çalışmaların önemi, sportif faaliyetlerde karşılaşılan problemlerle de ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte spor tesisleri, spor aletleri ve ekipmanlarının yeterliliği, erişimi ve ulaşılabilirliği engelliler için şüphesiz en önemli unsurlardan bazılarıdır.

Bu tespitler ışığında, engelli bireylerin spor salonlarında veya kendi kişisel alanlarında egzersiz yapmalarını kolaylaştıracak ve değişik kas gruplarını çalıştıran spor aletlerini bir arada barındıracak engelli dostu bir sisteme ihtiyaç vardır. Engellilerin spor hayatına kazandırılması için bu tür ürünlerin önemi günden güne artmakta ve bu tarz ürünler bir ihtiyaç haline gelmektedir. Bu çalışma ile engelliler için birbirinden bağımsız ve ulaşılması zor konumlarda bulunan spor aletlerini tek bir sistemde toplamak hedeflenmiştir. Böylece, hareket kabiliyeti kısıtlı engelli bireyler için faydalı, mevcut ihtiyacı karşılayacak, esnek, kullanıcı odaklı, estetik ve inovatif bir ürünün konsept tasarımı amaçlanmıştır.

Bir tasarım için kullanılan araç ve gereçler kadar uygulanan metodoloji de önemlidir. Bu zamana kadar tasarımda teorik bir altyapı geliştirmek ve daha bilinçli bir şekilde tasarım yapılmasını sağlamak için Pahl ve Beitz [8, 9], French [10], Hubka ve Eder [11], Cross [12], Ullman [13] ve Pugh [14] gibi isimler makine mühendisliğinde tasarım metodolojisini anlatan modeller önermişlerdir. Bu modeller arasında, Pahl ve Beitz'in kendi deneyimleri ve profesyonel tasarımcıların gözlemlerini temel aldığı sistematik tasarım yaklaşımı, özellikle VDI-2221 tasarım işlem modeli, Ullman'ın 'Mekanik Tasarım Yöntemleri' gibi diğer tasarım modellerinin gelişmesine büyük katkı sağlayarak en yaygın kullanılan metotlardan biri olarak yerini almıştır [15].

Sistematik tasarım yaklaşımı temel mühendislik eğitimi almış her mühendisin, kendi yetenek ve tecrübelerine bağlı olmaksızın, metodik şekilde belirlenmiş olan ilkeleri takip etmesi halinde en iyi tasarım çözümüne ulaşacağını öngören, geleneksel tasarım yöntemlerine göre daha fazla çözüm seçeneği elde etmemizi sağlayan bilimsel bir süreçtir. Bu yaklaşım, tasarımcının öncelikle projenin devamı için çok önemli rol oynayan problemleri yaratıcı zihinsel aktiviteyi kullanarak belirlemesine, birçok kısıtı değerlendirmeye alarak çözüm alternatifleri bulmasına ve bunlar içerisinde yapılacak teknik ve ekonomik değerlendirme sonucunda en iyi tasarıma ulaşması esasına dayanır [16, 17]. Dolayısıyla, bu çalışmada Pahl ve Beitz'in önerdiği, ardından Feldhusen ve Grote'nin daha da geliştirdiği sistematik tasarım yaklaşımı kullanılmıştır. Böylece engelli bireylerin sportif faaliyetlere katılımını ve spor hizmetlerinden yararlanabilmesini kolaylaştırabilecek en iyi, en faydalı ve en ekonomik engelli dostu çok fonksiyonlu bir spor aletinin kavramsal tasarımı hedeflenmiştir.

2. ENGELLİ DOSTU SPOR ALETİNİN KAVRAMSAL TASARIMI (DISABLED-FRIENDLY FITNESS EQUIPMENT'S CONCEPTUAL DESIGN)

Bu çalışmada, farklı egzersizler için üretilmiş farklı spor aletlerine erişimde özellikle engelli bireylerin zorluk çektiği düşünülerek bu spor aletlerini tek bir sistemde toplayacak engelli dostu bir spor aletinin konsept tasarımı amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan sistematik tasarım yaklaşımının konsept tasarımıyla ilgili aşamaları şu şekildedir:

- Teknik ödevin açıklanması
 - Görevin aydınlatılması
 - İhtiyaç listesi oluşturma
- Konsept Tasarım
 - Temel problemleri belirlemek için soyutlama yapma

- Fonksiyon yapılarını kurma
- Alt fonksiyonlar için çözüm seçenekleri araştırma
- Çözüm seçeneklerini birleştirme ve uygun birleşimleri seçme
- Çözüm seçeneklerini teknik ve ekonomik kriterlere göre değerlendirme

2.1. Görevin Aydınlatılması ve İhtiyaç Listesi Hazırlama (Clarifying the Task and Setting Up the Requirements List)

Tasarım probleminin çözümü için öncelikle görevi tam olarak kavramak gerekir. Bu nedenle bu aşamada teknik ödevin aydınlatılması ve analizi gerçekleştirilir. Görev, spor salonlarında veya bireylerin kişisel alanlarında bulunan farklı spor aletlerini tek bir yerde toplayarak sporda egzersiz değişimlerini özellikle ortopedik, görme ve işitme engelliler için kolaylaştıran bir spor aletini çok fonksiyonlu olarak esnek, güvenli, kullanıcı odaklı, estetik ve inovatif bir şekilde tasarlamaktır.

Görevin tam olarak aydınlatılması amacıyla tasarlanacak spor aleti için gerekli ihtiyaçlar Engelli Çalışanlar İçin İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi [18], Engelliler için Evrensel Standartlar Kılavuzu [19], Engellilerin Erişebilirliğinde Engelsiz Çevreler Tasarlama Kılavuzu [20] ve Engelsiz Tasarım Kılavuzunda [21] belirtilen temel prensip ve tavsiyeler incelenmiştir. Bu sayede bütün tasarım aşamalarında esas alınacak ilkeler belirlenmiş ve buna göre bir tasarım şartnamesi, diğer bir deyişle ihtiyaç listesi hazırlanmıştır. Tablo 1'de engelli bireylerin kullanımına uygun olarak tasarlanması hedeflenen spor aletinin ihtiyaç listesi verilmiştir. Sistematik tasarım yaklaşımına göre ihtiyaç listesi gelişime açık, canlı ve dinamik bir belgedir. Diğer bir deyişle, bu tasarım şartnamesi gerektiğinde tasarım süreci içerisinde güncellenebilir. Listede yer alan ihtiyaçlar; İstek (İ) ve Arzu (A) şeklinde tanımlanmıştır.

Tablo 1. İhtiyaç listesi

| Firma: YTÜ | | İhtiyaç Listesi Engelli Dostu Spor Aleti | Tarih: 28.05.2021 |
|----------------------|-----|---|--|
| Değişiklik- (ler) | İ,A | İstekler | Sorumlu: Abdullah Çelik, C.Oktay Azeloğlu |
| | İ | Tasarlanacak spor aleti Tricep pushdown, Lat pulldown, Chest fly, Chest press, Shoulder press, Rear delt fly, Front shoulder raise ve Shoulder lateral raise hareketlerini yapacak fonksiyonlara sahip olacaktır. | |
| | İ | Tek kolu ampute olan bireyler düşünülerek ilgili hareketler tek kolla yapılabilecek şekilde tasarlanacaktır. | |
| | İ | Spor aletinde konumu ayarlanabilir egzersiz bisikleti bulunacak ve kendi elektrik motoru sayesinde pedalları döndürebilen fizyoterapi bisikleti olarak kullanılabilir özellikte olacaktır. | |
| | A | Bir sürekli pasif hareket cihazı (CPM) spor aletine entegre olarak fizyoterapi amaçlı kullanılabilir. | |
| | İ | İstenen tüm hareketler olabildiğince az mekanizma ile yapılabilecek şekilde tasarlanacaktır. | |
| | İ | Spor aleti bulunacağı mekânda duvara ve zemine sabitlenecek şekilde tasarlanacaktır. | |
| | İ | Spor aletini sabitlemede gevşemeyi önleyici bağlantı elemanları kullanılacaktır. | |
| | İ | Kullanılan makaralar kabloların dışarı çıkmasını engelleyici kapalı tasarımda olacaktır. | |
| | İ | Her bir fonksiyon için hareketlerin nasıl yapılacağını, başlangıç ve bitiş pozisyonlarını, çalıştığı kas gruplarını gösteren anlatımlar ve uyarılar olacaktır. | |
| | İ | İşaret ve uyarılar kolay anlaşılabilir, basit, okunaklı, göz kamaştırmayan uygun renkte ve görme engellilerin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde olmalıdır. | |
| | İ | Uyarılar ve genel anlatım görüntülü olarak izlenebilecek ve sesli olarak dinlenebilecektir. (Görme ve işitme engelliler düşünülerek) | |
| | İ | Görme engelliler için resimler kabartmalı olacak ve Braille alfabesi kullanılarak anlatılacaktır. | |
| | İ | Montaj esnasında spor aletine uzanan yola görme engelliler için hissedilebilir kılavuz zemin ve spor aletinin bulunduğu yüzeye hissedilebilir uyarıcı yüzey döşenecektir | |
| | İ | Döşeme rengi ve metal aksamları dikkat çekici zıt renklerde olacaktır. | |
| | İ | Spor aletinin geometrisi ve parçaları yaralanmayı önleyici şekilde olacaktır. | |
| | İ | Spor aletinin şasisinde kullanılacak profil malzemeler dairesel veya eliptik şekilli olacaktır ve kullanıcıya zarar verebilecek köşeler yuvarlatılmış olacaktır. | |
| | A | Mümkünse kullanıcı cihazdan ayrılmadan ve yardıma ihtiyaç duymadan gerekli ayarları yapabilmelidir. | |
| | İ | Üzerine oturan sehpa yerine duruş destekli, yüksekliği ayarlanabilir, yatırılabılır ve ergonomik bir tekerlekli sandalye kullanılacaktır. | |
| | İ | Tekerlekli sandalyeyi sabitleyici mekanizmalar bulunacaktır ve tekerlekler kilitlenebilir olacaktır. | |

| | | |
|------------|---|---|
| | İ | Spor aleti tek elle tutulabilecek, kolayca kavranabilen anatomik şekilli, kaymayan malzemeli tutacıklara sahip olacaktır. |
| | İ | Tutunma kolları U biçiminde, en az 30 cm uzunluğunda, 3.5 cm çapında olacak ve tekerlekli sandalyelilerin spor aletine yerleşirken fark edebileceği şekilde yerden 1 m yukarıda konumlandırılacaktır. |
| | İ | Epilepsi hastalarının krizlerini tetikleyici unsurlardan biri olan gürültüyü azaltmak için ağırlık plakaları, egzersiz esnasında mümkün olduğunca az ses çıkaracak şekilde tasarlanacak veya ağırlık plakaları kullanılmayacaktır. |
| | İ | Zemindeki rampalarda güvenli eğim yüzdesi 12 cm'e kadar olan yükselti farkı için en fazla % 10 olmalıdır. |
| | İ | Spor aletinin zeminle temas ettiği yerlerde zemine zarar vermeyen ve sönüm sağlayan pabuçlar bulunacaktır. |
| | İ | Sporcunun sabit kalmasını sağlayıcı emniyet kemeri bulunacaktır. |
| | İ | Acil durum butonuna basılmasıyla kaydedilen kişilere çağrı iletilebilecektir. |
| | İ | Tekerlekli sandalyede nabız, kalp ritmi vs. ölçen sensörler bulunacaktır. |
| | İ | Monitör üzerinden zaman, tekrar sayısı (SPM (dakika başına hareket), strokes (toplam hareket)), nabız, yakılan kalori, düşük batarya uyarısı fonksiyonları görülebilecektir. |
| | İ | Sistem bilgisayarı üzerinden eğitmenlere canlı olarak bağlanılabilir, ayrıca kayıt üzerinden de eğitmenler takip edilebilir. |
| | A | Spor aleti üzerinde kamera bulunacaktır. Sporcu istediğinde kayıt alıp kendi hareketlerini izleyebilecek veya canlı olarak kaydını eğitmene iletebilecektir. |
| | A | Sistem bilgisayarı eğlence amaçlı da kullanılabilir, müzikler dinlenebilir ve filmler oynatılabilir. |
| | A | Spor aletine Bluetooth ile bağlanılabilecektir. |
| | A | Spor aleti üzerinde MP3, kulaklık girişi, tablet bilgisayar girişi de bulunabilir. |
| | İ | Hareket yarım kaldığında kendini kilitleyen güvenlik sistemi olacaktır |
| | A | Spor aletinde sorun oluştuğunda sistem sesli, titreşimli ve görsel olarak uyarı verecektir. |
| | İ | Erken uyarı sistemi, acil durumlarda yapıların yangın alarm sistemi ile bağlantı kurularak, sistemin yanıp sönen lambalar ile ses veya titreşimli bir çağrı cihazı, işitme engellilerin tehlike durumundan haberdar olmalarını sağlayabilecektir. |
| | İ | Lambalar acil duruma göre farklı renkte yanacak ve bunların eğitimi ve bilgisi kullanım kılavuzu ve talimatnamede işitsel, görsel ve dokunma duygusu ile verilebilecektir. |
| | İ | Çöp kutuları geri dönüşüm için ayrılacak, hareketleri kısıtlamayacak bir yerde konumlandırılacak, zıt renkli ve kolay algılanabilir olacaktır. |
| | A | Kondisyon ve Fizyoterapi bisikleti jeneratörlü sistemi sayesinde ihtiyaç duyulan elektriğin bir kısmını kendisi üretebilir. |
| 26/06/2021 | İ | Kondisyon ve Fizyoterapi bisikleti sürgülü sistemle spor aletine gömülü olacaktır. Hem tutamaç ile çekilebilecek hem de uzaktan kumanda ile hareket ettirilebilecek şekilde tasarlanacaktır. |

2.2. Temel Problemleri Belirlemek İçin Soyutlama Yapma (Abstracting to Identify the Essential Problems)

İhtiyaç listesinin incelenmesinin ardından istekler ve kısıtlar doğrultusunda bir genelleme yapılarak soyutlamaya gidilir. İhtiyaç listesinde belirtildiği üzere önemli problemler aşağıdaki gibidir;

- Tricep pushdown, Lat pulldown, Chest fly, Chest press, Shoulder press, Rear delt fly, Front shoulder raise, Shoulder lateral raise hareketlerini yapma ve bisiklet çevirme hareketi sağlama
- Fizik tedavi sağlama
- Mekanizmayı güvenli bir şekilde sabitleme
- Sporcuya spor aletinin kullanımını öğretme
- Sporcu güvenliğini sağlama
- Sporcuya kullanım kolaylığı ve rahatlık sağlama
- Sporcunun fiziksel özellikleri hakkında bilgi edinmesini sağlama
- Acil durumlarda sporcunun uyarılmasını ve güvenliğini sağlama

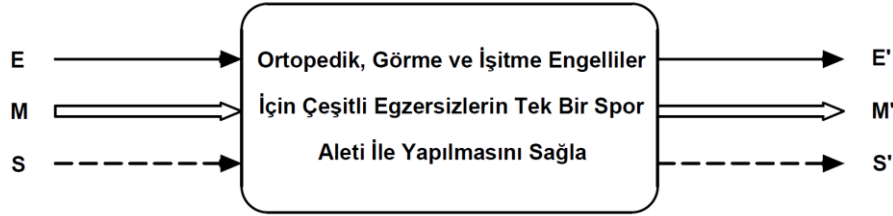
Problemler sadeleşirse;

- Çeşitli spor hareketleri yapma ve sisteme uygun fizyoterapi hareketleri sağlama
- Sistemin ve sporcunun ergonomisini ve güvenliğini sağlama
- Sporcunun engelleri düşünülerek spor hareketleri hakkında çeşitli yollarla bilgi verme
- Acil durumlarda sporcuya uyarı verme ve ilgili yerlere durum bilgisi iletme

Sonuç olarak bu tasarım için çözülmesi gereken temel problem “ortopedik, görme ve işitme engellilerin farklı spor hareketlerini bir sistem içerisinde güvenli bir şekilde yapması” olarak tanımlanabilir.

2.3. Fonksiyon Yapıları Kurma (Establishing Function Structures)

Sistematik tasarımda fonksiyon yapıları teknik sistemin giriş ve çıkış ilişkileri ile işlevlerini belirtir. Tasarlayacağımız çok fonksiyonlu spor aletinde soyutlama sonucunda elde ettiğimiz genel problem tanımına göre belirlenen temel prensip, giriş-çıkış büyüklükleri Madde (M-M'), Sinyal (S-S'), Enerji (E-E') akışına oturtularak ana fonksiyon yapısı (kara kutu) Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Ana Fonksiyon Yapısı

Teknik sistemler alt sistemlere bölünebildiği gibi ana fonksiyon da bu görevleri yerine getirebilecek alt sistemlere bölünebilir. Bu noktada sonraki çözüm arayışlarını kolaylaştırmak amacıyla ana fonksiyonu yerine getirecek alt fonksiyonlar belirlenir ve her bir alt fonksiyonu gösteren fonksiyonlar zinciri oluşturulur [22, 23]. Engelli dostu spor aleti için oluşturulan fonksiyonlar zinciri Tablo 2'de gösterilmiştir.






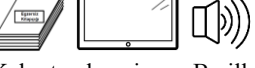
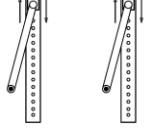
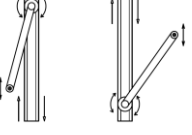
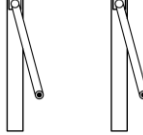


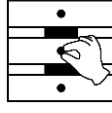


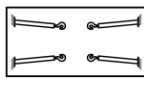
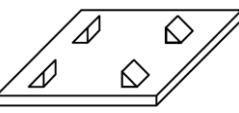
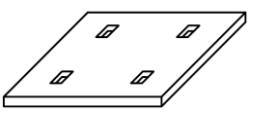

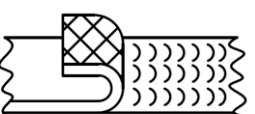

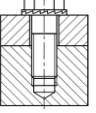
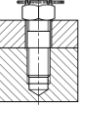
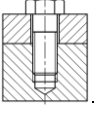
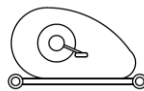





Tablo 2. Fonksiyonlar zinciri

| Fonksiyonlar | | Fonksiyonun Tanımı |
|-----------------------------------|-------------------------------|--|
| Ana Fonksiyon | 1. Derece Fonksiyon | Ortopedik, görme ve işitme engelliler için çeşitli egzersizlerin tek bir spor aleti ile yapılması |
| Alt Fonksiyonlar | 2. Derece Fonksiyonlar | 1. Sistemi açmak |
| | | 2. Sporcunun hangi hareketin nasıl yapılacağını öğrenmesini, gerekli talimatları ve uyarıları anlamasını sağlamak. |
| | | 3. Eğitime bağlanmak |
| | | 4. Müzik çalmak, Video veya film oynatmak |
| | | 5. Gerekli ayarları yapmak |
| | | 6. Kendini sabitlemek |
| | | 7. İstenilen egzersiz hareketinin yapılmasını sağlamak |
| | | 8. Çağrı göndermek |
| | | 9. Acil durumda uyarı |
| | 3. Derece Fonksiyonlar | 7.1. Arka kol kaslarını çalıştırmak |
| | | 7.2. Sırt kaslarını geliştirmek |
| | | 7.3. Göğüs kaslarını çalıştırmak |
| | | 7.4. Omuz kaslarını çalıştırmak |
| 7.5. Kardiyo yapmak | | |
| 7.6. Bacak kaslarını güçlendirmek | | |

2.4. Alt Fonksiyonlar İçin Çözüm Seçenekleri Belirleme Ve Uygun Bağlantıları Seçme (Identify Solution Principles for Sub-Functions and Selecting Suitable Working Structures)

Tasarıma ait alt fonksiyonların oluşturulmasından sonra sisteme ait her bir alt fonksiyona ilgili görevi yerine getirecek çözümler aranır. Alternatif çözümlerin araştırılmasında sistemik yaklaşım geleneksel, sezgisel veya sezgisel olmayan yöntemlerin kullanılabilirliğini gösterir [8, 9]. Bu çalışmada çözüm seçeneklerinin belirlenmesinde geleneksel yöntemler içerisinde yer alan literatür araştırması ve mevcut sistemlerin analizi metodlarından faydalanılmıştır. Ayrıca sezgisel yöntemler içerisinde bulunan beyin fırtınası yöntemi de kullanılmıştır. Sonuç olarak Tablo 3'te her bir alt fonksiyon için belirlenen çözüm alternatifleri gösterilmiştir.

Tablo 3. Öncelikli tasarım çözümleri tespit edilen sınıflandırma şeması

| | Çözüm Seçeneği | Çözüm Seçeneği | Çözüm Seçeneği |
|--|---|---|--|
| Alt Fonksiyonlar | Ç1 | Ç2 | Ç3 |
| Sistemi Açma / Kapatma (F1) |  Basmalı buton / Uzaktan kumanda |  Sesli komut |  Piezoelektrik kuvvet sensörleri |
| Anlatım, Talimatlar ve Uyarılar (F2) |  Kabartmalı resim ve Braille alfabeti içeren sesli kitapçık |  Hem görüntülü hem de sesli olarak (Monitör ve hoparlör) |  Kabartmalı resim ve Braille alfabeti içeren sesli kitapçık/ Monitör/ Hoparlör |
| Egzersiz Kolları Pozisyon Ayarı (F3) |  Yukarı aşağı yönlü kademeli oynar sabit kollar |  Yukarı aşağı yönlü kayar kızaklı ayarlanabilir kollar |  Sabit Kollar |
| Egzersiz Kuvveti Oluşturma (F4) |  Döküm plakalar |  Manyetik Direnç | - |
| Ağırlık (Kuvvet) Ayarı (F5) |  Manuel |  Dokunmatik ekran üzerinden, otomatik |  Dokunmatik ekran / Uzaktan Kumanda |
| Tekerlekli Sandalye Sabitleme (F6) |  4 kancadan (retraktör) oluşan emniyet kemeri sistemi ile |  Sabitleme takozları ile |  Yuva açılarak |
| Emniyet Kemeri (F7) |  Paraşüt tipi, Bacak destekli ve Klipsli |  Bel tipi ve Cırt cırt bantlı |  Bel tipi ve Tokalı |
| Sistemin Sabitlenmesi (F8) |  Cıvata – Nord-Lock rondela |  Taçlı somun - Gupilya |  Standart Altıköşe Cıvata |
| Kondisyon ve Fizyoterapi Bisikleti (F9) |  Manyetik / Bağımsız |  Mekanik / Dikey |  Mekanik / Eliptik |
| İkaz sinyalleri (F10) |  Işık ile uyarı |  Ses ile uyarı |  Işık / Ses / Titreşim |

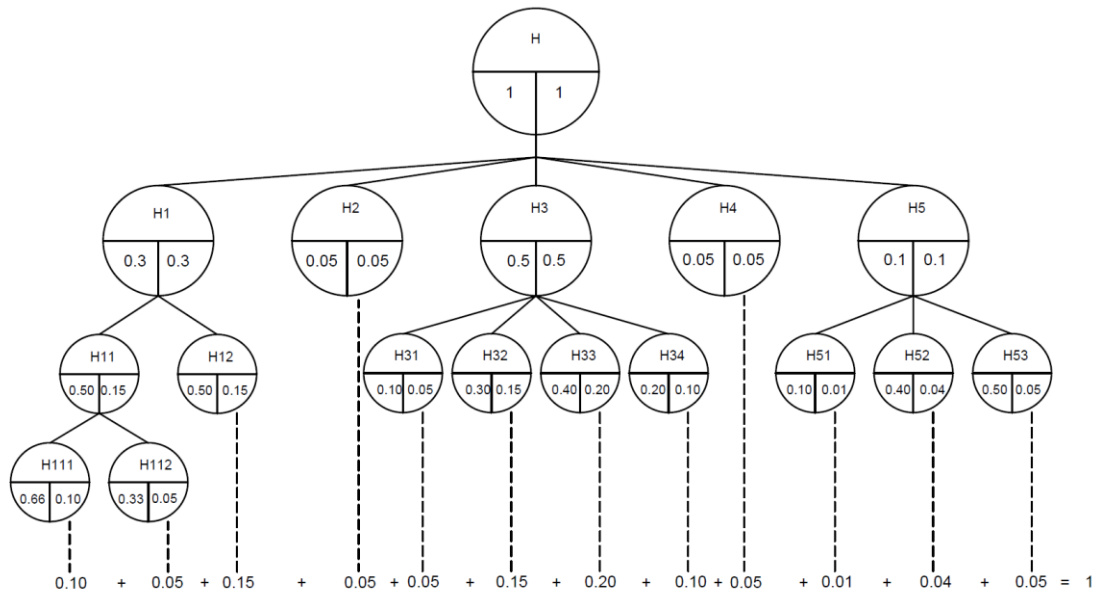
Tablo 3'teki sonuçlar incelendiğinde ilk etapta 39.366 konsepte erişilebileceği görülmektedir, fakat tabloda temel problemi karşılamayan bazı çözüm seçenekleri elenerek istekler listesini karşılayamayacak durumdaki çözümler değerlendirme dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla, çözüm seçeneklerinin indirgenmesiyle sistemin tasarımı için elimizde 16 farklı çözüm kalmıştır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- Çözüm1 : F1Ç1, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm2 : F1Ç1, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm3 : F1Ç1, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm4 : F1Ç1, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm5 : F1Ç3, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm6 : F1Ç3, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm7 : F1Ç3, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm8 : F1Ç3, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm9 : F1Ç1, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm10: F1Ç1, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm11: F1Ç1, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm12: F1Ç1, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm13: F1Ç3, F2Ç3, F3Ç1, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm14: F1Ç3, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç1, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm15: F1Ç3, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç1, F9Ç1, F10Ç3
 Çözüm16: F1Ç3, F2Ç3, F3Ç2, F4Ç2, F5Ç3, F6Ç1, F7Ç1, F8Ç2, F9Ç1, F10Ç3

Bu aşamadan sonra artık elde edilmiş çözümlerin değerlendirmesi ve konseptin belirlenmesi söz konusu olabilir.

2.7. Çözüm Seçeneklerinin Teknik ve Ekonomik Kriterlere Göre Değerlendirmesi (Evaluate Variants Against Technical and Economic Criteria)

Bu aşamada en uygun konseptin belirlenmesi için teknik ve ekonomik değerlendirmeler yapılır. Bu değerlendirmelerin metodolojik olarak ve hiyerarşik bir düzenle gerçekleştirilebilmesi için hedefler ağacı (amaçlar ağacı) oluşturulur ve her bir teknik ve ekonomik hedefin önem derecesine göre bu amaçlar ağırlıklandırılır. Şekil 2'de probleme ilişkin ağırlıklandırılmış hedefler ağacı oluşturulmuştur. Şekilde "H: Hedef", "Hi: i. seviyedeki hedefler", "Hij: ij. seviyedeki alt hedefler" olarak tanımlanabilir.



Şekil 2. Ağırlıklandırılmış hedefler ağacı

Burada hedefler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- H : En Uygun Spor Aleti
H1 : Kullanım Kolaylığı
H11 : Kompakt Olma
H111 : Farklı Fonksiyonlara Erişim Kolaylığı
H112 : Az Yer Kaplama
H12 : Ergonomik Olma
H2 : Maliyet (Ucuzluk)
H3 : Yüksek Mekanik Özellikler
H31 : Hafiflik
H32 : Düşük Gürültü
H33 : Emniyet
H34 : Uzun Ömür
H4 : Estetik Olma
H5 : Basitlik
H51 : Üretim Kolaylığı
H52 : Montaj Kolaylığı
H53 : Bakım Kolaylığı

Hedefler ağacında tasarım için belirlenen teknik ve ekonomik kriterler toplam ağırlıkları 1.0 (%100) olacak şekilde dağıtılmıştır. Bu kriterlerin ilgili konsept tarafından gerçekleştirilme dereceleri de “4: İyi”, “3: Yeterli”, “2: Orta”, “1: Zayıf”, “0: Uygun Değil” şeklinde puanlanmıştır. Her bir konseptin ağırlıklı puanı, puanlanmış her bir çözüm seçeneği (v_{ij}) ile hedef için belirlenen ağırlık faktörü (w_i) çarpılarak hesaplanır ($wv_{ij}=v_{ij} \cdot w_i$). Böylece, her bir çözüm seçeneği için ağırlıklı hedef puanların toplanmasıyla konseptlere ilişkin “ağırlıklandırılmış puanlar (OWV_j)” elde edilir. İlgili hesaplar (1) eşitliği ile formüle edilmiştir.

$$OWV_j = \sum_{i=1}^n w_i \times v_{ij} = \sum_{i=1}^n wv_{ij} \quad (1)$$


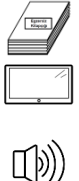



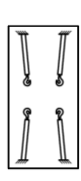
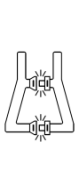
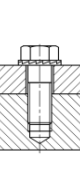
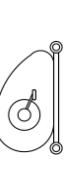

Ele alınan probleme ilişkin alternatif çözümlerin teknik ve ekonomik değerlendirme sonuçları Tablo 4’te görülmektedir.

Tablo 4. Teknik ve ekonomik değerlendirmeler

| | H111 0.1 | H112 0.05 | H12 0.15 | H2 0.05 | H31 0.05 | H32 0.15 | H33 0.2 | H34 0.1 | H4 0.05 | H51 0.01 | H52 0.04 | H53 0.05 | Puan |
|----------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Çözüm1 | 2x | 2x | 2x | 3x | 2x | 3x | 4x | 4x | 4x | 4x | 4x | 4x | 3.1 |
| Çözüm2 | 3x | 2x | 3x | 3x | 2x | 3x | 4x | 4x | 4x | 3x | 4x | 4x | 3.39 |
| Çözüm3 | 2x | 4x | 2x | 3x | 4x | 4x | 4x | 3x | 4x | 4x | 4x | 3x | 3.3 |
| Çözüm4 | 2x | 2x | 2x | 4x | 2x | 3x | 3x | 4x | 3x | 4x | 3x | 4x | 2.86 |
| Çözüm5 | 3x | 2x | 3x | 2x | 2x | 3x | 4x | 3x | 4x | 3x | 3x | 3x | 3.1 |
| Çözüm6 | 4x | 2x | 4x | x | 2x | 3x | 4x | 3x | 4x | 2x | 3x | 3x | 3.29 |
| Çözüm7 | 3x | 4x | 3x | 2x | 4x | 4x | 4x | 2x | 4x | 3x | 3x | 2x | 3.3 |
| Çözüm8 | 3x | 2x | 3x | 3x | 2x | 3x | 3x | 3x | 3x | 2x | 2x | 3x | 2.85 |
| Çözüm9 | 2x | 4x | 2x | 4x | 4x | 4x | 3x | 3x | 3x | 4x | 3x | 3x | 3.06 |
| Çözüm10 | 3x | 2x | 3x | 3x | 2x | 3x | 3x | 4x | 3x | 3x | 3x | 4x | 3.05 |
| Çözüm11 | 3x | 4x | 3x | 3x | 4x | 4x | 4x | 3x | 4x | 3x | 4x | 3x | 3.54 |
| Çözüm12 | 3x | 4x | 3x | 4x | 4x | 4x | 3x | 3x | 3x | 3x | 3x | 3x | 3.3 |
| Çözüm13 | 2x | 4x | 3x | 3x | 4x | 4x | 3x | 2x | 3x | 3x | 2x | 2x | 2.96 |
| Çözüm14 | 4x | 2x | 4x | 2x | 2x | 3x | 3x | 3x | 3x | 2x | 2x | 3x | 3.05 |
| Çözüm15 | 4x | 4x | 4x | x | 4x | 4x | 4x | 2x | 4x | 2x | 3x | 2x | 3.49 |
| Çözüm16 | 4x | 4x | 4x | 2x | 4x | 4x | 3x | 2x | 3x | 2x | 2x | 3x | 3.3 |

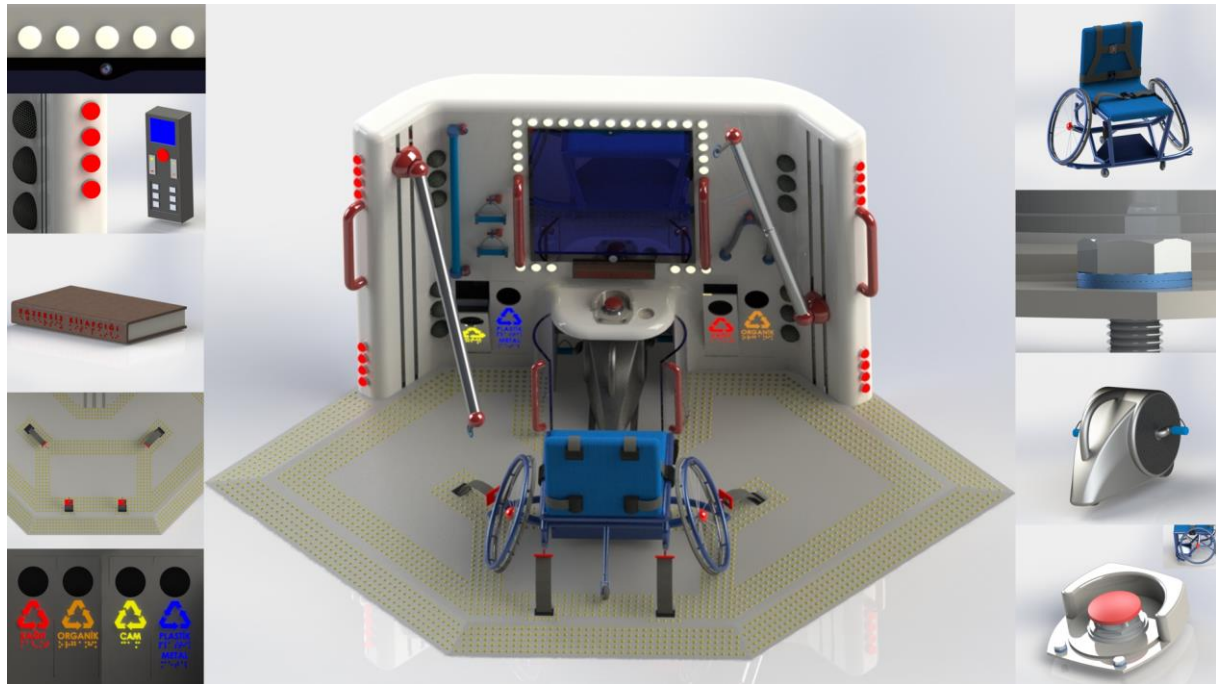
Tablo 4’teki sonuçlar incelendiğinde çözüm seçenekleri içerisinde teknik ve ekonomik kriterlere göre yapılan değerlendirme sonucunda en uygun çözüm fikrinin Çözüm11 olduğu görülmektedir. Tablo 5’te konsept olarak belirlenen Çözüm11’in alt fonksiyonları verilmiştir.

Tablo 5. Belirlenen konseptin açıklaması

| Sistemi Açma / Kapatma | Anlatım, Talimatlar ve Uyarılar | Egzersiz Kolları Pozisyon Ayarı | Egzersiz Kuvveti Oluşturma | Ağırlık (Kuvvet) Ayarı | Tekerlekli Sandalye Sabitleme | Emniyet Kemerleri | Sistemin Sabitlenmesi | Kondisyon ve Fizyoterapi Bisikleti | İkaz sinyalleri |
|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|
| F1Ç1 | F2Ç3 | F3Ç2 | F4Ç2 | F5Ç3 | F6Ç1 | F7Ç1 | F8Ç1 | F9Ç1 | F10Ç3 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

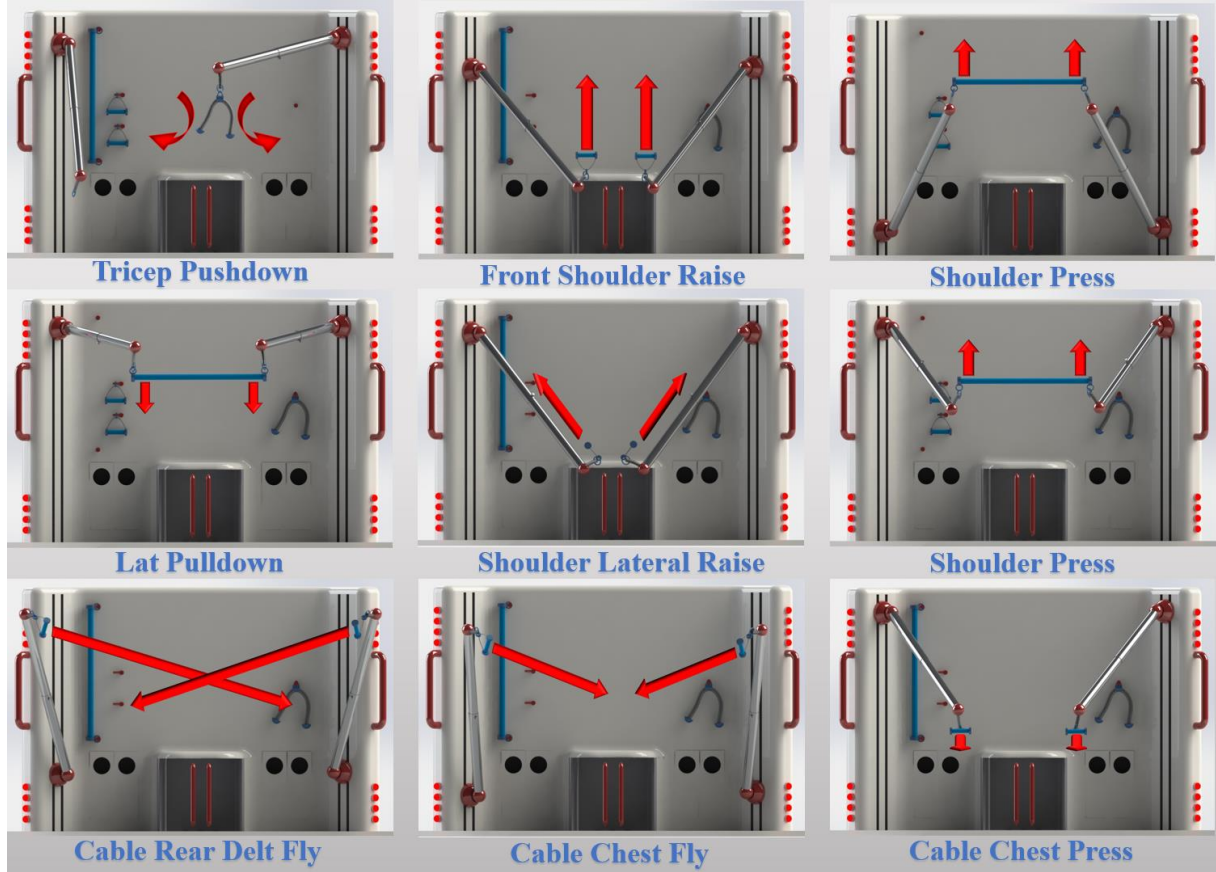
2.7. Şematik Gösterim ve Tartışma (Schematic Representation and Discussion)

Tasarımda belirlenen hedefler, istekler ile teknik ve ekonomik değerlendirmeler sonucunda karar verilen konseptin zihinde canlanabilmesi ve algılanabilmesi amacıyla Şekil 3'te konseptle ilişkin şematik bir gösterim sunulmuştur.



Şekil 3. Sistematik tasarım yaklaşımıyla oluşturulan engelli dostu spor aleti

Özellikle engellilerin egzersiz değişimlerinde farklı spor aletlerine erişimini kolaylaştırmak için bir tek merkezde farklı spor aletlerini toplayan bu çok fonksiyonlu tasarımda çalışmak için öncelikle sistem buton veya tekerlekli sandalyedeki yuvası üzerinde bulunan uzaktan kumanda ile açılır. Sonrasında talimatlar ve uygulamalı anlatımlar ekrandan izlenilir, dinlenilir veya Braille alfabesi ile de yazılmış kitapçıktan okunur. Gerekli ayarlar uzaktan kumanda veya dokunmatik ekran üzerinden yapılır. Tekerlekli sandalye 4 kancadan oluşan retraktör sistemi ile sabitlenir ve tekerlekli sandalye üzerinde bulunan emniyet kemerleri takılır. İstenilirse video izlenebilir, müzik dinlenebilir veya eğitime bağlanılarak ekran üzerinden canlı ders alınır. Yapılmak istenilen egzersiz seçildikten sonra, ayarlanabilir kollar, kondisyon bisikleti veya kendi elektrik motoru sayesinde pedalları döndürebilen fizyoterapi bisikleti ile çalışılır. Herhangi bir acil durumda spor aleti üzerindeki veya tekerleklerin ortasındaki kırmızı butona basılır.



Şekil 4. Yukarı aşağı yönlü kayar kızaklı ayarlanabilir kollar ile yapılabilen egzersiz hareketleri

Aşağıda Şekil 4'te gösterilen ayarlanabilir kollar ile yapılabilen egzersiz hareketleri kısaca tarif edilmiştir:

Tricep pushdown: Arka kol kasları triceps halatını yukarıdan aşağı çekerek çalıştırılır.

Lat pulldown: Sırt ve kanat kasları kollardaki uzun barı yukarıdan aşağı doğru üst göğüs bölgesine çekerek çalıştırılır.

Front shoulder raise: Ön omuz kasları avuç içleri aşağı bakar şekilde tutulan tutamaçları, kollar yere bakar pozisyondan dik pozisyona getirilerek çalıştırılır.

Shoulder lateral raise: Orta omuz kasları sarkık halde duran kolların yanlara açılmasıyla çalıştırılır.

Shoulder press: Omuz kasları çene seviyesindeki uzun barı yukarı doğru iterek çalıştırılır.

Cable rear delt fly: Sırt ve omuz kasları halat uçlarına takılan tutamaçların yukarıdan kolların hafif kırılarak omuz hizasına çekilmesiyle çalıştırılır.

Cable chest fly: Göğüs kasları kollar açık halden tutamaçlar çekilerek kapalı hale getirilmesiyle çalıştırılır.

Cable chest press: Göğüs kasları halatlara bağlı tutamaçların ileri itilmesiyle çalıştırılır.

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, engelli bireylerin kullanımına uygun çok fonksiyonlu yeni bir spor aletinin konsept tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla, bağımsız spor aletlerini bir araya getirerek engellilerin her bir spor aletine ulaşımını kolaylaştıran bir tasarım hedeflenmiş ve böylece engelli bireylerin kolaylıkla ve güvenle kullanabilecekleri bir tasarım oluşturulmuştur. Çalışmada, konseptin oluşturulmasında Pahl-Beitz tarafından önerilen sistematik yaklaşım uygulanmıştır. Bu amaçla öncelikle teknik ödev tanımlanmış ve analiz edilerek detaylı bir tasarım şartnamesi oluşturulmuştur. Sonrasında temel problem saptanmış ve tasarımın fonksiyon yapısı oluşturulmuştur. Ardından her bir alt fonksiyon için çözüm yöntemleri aranmış, bulunan çözümler bir araya getirilerek çeşitli çözüm önerileri ve tasarım fikirleri elde edilmiştir. Bu tasarımların teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesiyle de en uygun çözüm fikrine ulaşılmıştır. Sunulan çözüm engelli dostu çok fonksiyonlu bir spor aleti olarak hem spor yapmayı kolaylaştırmakta hem de fizik tedavi imkânı sunmaktadır. Çalışmada sistematik tasarım yaklaşımına ait ilkelerin metodik olarak kullanılmasının en uygun çözüm fikrine erişmeyi kolaylaştırdığı görülmektedir. Bu aşamadan sonra konsept tasarımı

tamamlanan spor aletinin şekillendirme tasarımına geçilmesi ve belirlenen tasarım fikrinin somut olarak gerçekleştirilmesi düşünülecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Janna LC, Monika S. (2008). Constraints Experienced by Elite Athletes with Disabilities in Kenya, with Implications for the Development of a New Hierarchical Model of Constraints at the Societal Level. *Journal of Leisure Research*, 40, 128-155.
- [2] Kızar, O. (2018). Türkiyedeki Spor Tesislerinin Engelliler İçin Yeterlilik Düzeylerinin Kullanıcılar Açısından Araştırılması, Doktora Tezi. T.C. Fırat Üniversitesi , Elazığ.
- [3] Konar, N., Pepe, K. (2003). Rehabilitasyon – Engelliler Spor ve Paralimpikler. *İ.Ü. Spor Bilimleri Dergisi*, 162- 166.
- [4] Richardson E. V., Smith B., Papathomas A. (2017). Crossing boundaries: The perceived impact of disabled fitness instructors in the gym. *Psychology of Sport and Exercise*, 29, 84-92.
- [5] Mor, A. (2009). Engelli Bireylerde Egzersizin Uyku Düzeni ve Aile İçi Sosyal İlişkilere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sakarya.
- [6] Sonuç, A. (2012). Zihinsel Engellilerde Sporun Öfke Düzeyine Etkisi, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Beden Eğitimi ve Spor Öğretmenliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Karaman.
- [7] Ruddell, J. L., & Shinew, K. J. (2006). The socialization process for women with physical disabilities: The impact of agents and agencies in the introduction to an elite sport. *Journal of Leisure Research*, 38, 421-444.
- [8] Pahl, G., Beitz, B. (1988). *Engineering Design, A systematic approach*. (London, Springer-Verlag).
- [9] G. Pahl, W. Beitz, J .Feldhusen, K. H. Grote. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer, Aachen.
- [10] French, M. (1985). *Conceptual Design for Engineers*, 2nd edition. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- [11] Hubka, V. & Eder, W.E. (1988). *Theory of Technical Systems: A Total Concept Theory for Engineering Design*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- [12] Cross, N. (2000). *Engineering Design Methods: strategies for product design*, 3rd edition, Chichester, John Wiley & Sons.
- [13] Ullman, D.G. (2010). *The Mechanical Design Process*, 4th edition, London, McGraw Hill.
- [14] Pugh, S. (1990). *Total Design: integrated methods for successful product engineering*, Wokingham, Addison-Wesley.
- [15] Kannengiesser, U., Gero, J. S. (2017). Can Pahl and Beitz' systematic approach be a predictive model of designing?, *Cambridge University Press, Des. Sci.*, vol. 3, e24.
- [16] Çavdar, F. Y., Börklü H. R., Çavdar, K., Sezer, H. K. (2019). The design process of the complex Special Utility Vehicle using the methodical design approach. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.13, No.4.
- [17] Börklü, H. R., Top N., (2018). Sistematik Tasarım Yaklaşımı İle Yeni Bir Zeytin Hasat Makinesi Tasarımı, *Journal of Engineering Sciences And Design*, 6(4), 659-664.

[18] Engelli Çalışanlar İçin İş Sağlığı ve Güvenliği Rehberi, İSGGM, 2016.

[19] WDU, USTAD, Engelliler için Evrensel Standartlar Kılavuzu, Universal Standards for Persons with Disabilities, İstanbul.

[20] Accessibility for the Disabled A Design Manual for a Barrier Free Environment, United Nations Economic and Social Commission for Western Asia, <http://www.un.org/esa/socdev/enable/designm/index.html>

[21] Engelsiz Tasarım Kılavuzu, (C. Koca, çev.), (2010). Dünya Engelliler Vakfı, İstanbul

[22] Kutay, M., G., Konstrüksiyon Sistematiği: Fonksiyon Analizi, (2009). Erişim adresi: http://www.guven-kutay.ch/konstruksiyon/30_02_ks_fonksiyon-analizi.pdf

[23] Azeloğlu, C. O., Alper, E. (2019). Yeni Bir Hidroterapi Egzersiz Aletinin Sistemik Konstrüksiyon Yaklaşımıyla Kavramsal Tasarımı, GU J Sci, Part C, 7(2): 291-302.

Modeling Sound Absorption Coefficient of Porous Asphalt Pavements: An Example of Thickness and Mixture Ratio

Tarık Serhat BOZKURT ^{1,*}  Ahmet Sertaç KARAKAŞ ² 

¹ Istanbul Technical University, Department of Architecture, ORCID: 0000-0001-5642-4986, 34367, Şişli / İSTANBUL

² Istanbul University, Rectorate, ORCID: 0000-0002-0840-2878, 34134, Fatih / İSTANBUL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 10.04.2022
Revision: 21.06.2022
Accepted: 29.08.2022

Highlights

- Reducing the Environmental Noise Level.
- Increasing the Sound Absorption Coefficient in Asphalt Pavements
- Numerical Modeling of Sound Absorption Coefficient in Asphalt Pavements

Keywords

Environmental noise control
Sound absorption
Porous asphalt
Numerical analysis

In order to reduce the environmental noise level, increasing the sound absorption coefficient in asphalt pavements has been investigated. In this context, the sound absorption coefficient of porous asphalt pavements was modeled according to the mixture content and varying thicknesses. Thanks to the prepared sound absorption coefficient numerical model analysis, the sound absorption coefficient can be analyzed.

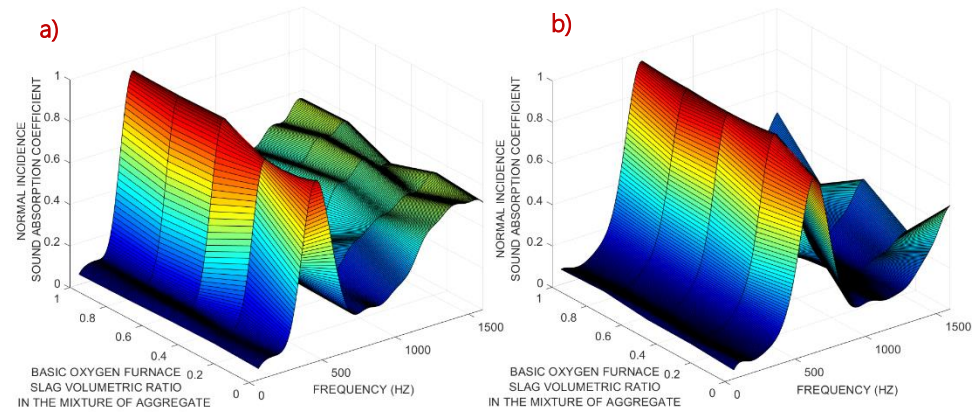


Figure A. 3-dimensional graph of the sound absorption coefficient according to the mixture ratio in the asphalt pavements, a) 10 cm, b) 6.35 cm

Purpose: In terms of human health, environmental noise should be reduced and kept under control. Increasing the sound absorption performance of asphalt pavements can reduce the environmental noise level. In this context, increasing the sound absorption coefficient and modeling of asphalt pavements were investigated.

Theory and Methods: In this study, the impedance tube sound absorption coefficient measurement results were used and modeled. The model curves were modeled in the MATLAB program with the curve fitting method.

Results: Changing the thickness and mixture content of asphalt pavements can increase sound absorption performance. In particular, the increase in asphalt coating thickness can increase the sound absorption coefficient in the range of 100 Hz to 500 Hz.

Conclusion: In this research, it was understood that the sound absorption coefficient of porous asphalt pavements can be increased by thickness variation and mixture content variation. With the model curves produced within the scope of the study, the sound absorption coefficient can be predicted according to the varying asphalt thicknesses.



Modeling Sound Absorption Coefficient of Porous Asphalt Pavements: An Example of Thickness and Mixture Ratio

Tarık Serhat BOZKURT^{1,*} Ahmet Sertaç KARAKAŞ²

¹ Istanbul Technical University, Department of Architecture, ORCID: 0000-0001-5642-4986, 34367, Şişli / İSTANBUL

² Istanbul University, Rectorate, ORCID: 0000-0002-0840-2878, 34134, Fatih / İSTANBUL

Abstract

Environmental noise should be kept under control due to its negative effects on human health. The sound absorption performance of asphalt pavements is an important parameter in environmental noise control. Increasing the sound absorption performance of asphalt pavements can reduce the environmental noise level. In this study, increasing the sound absorption coefficient in asphalt pavements has been investigated. It is observed that the sound absorption coefficient can be increased by asphalt pavement thickness change or the asphalt pavement mixture content change. In the research, the sound absorption coefficient measurement results of porous asphalt pavements were modeled and analyzed in the MATLAB program. The use of 0%, 25%, 50%, 75%, and 100% basic oxygen furnace slag aggregate ratio in the aggregate mixture in asphalt pavement was investigated, and the sound absorption coefficient of asphalt pavements of different mixtures was modeled in the MATLAB program. Moreover, sound absorption performances of 3 cm, 6.35 cm, and 10 cm thick asphalt pavements were examined according to 1/3 octave band frequencies, and the sound absorption coefficient was modeled in MATLAB program by curve fitting method according to varying asphalt thicknesses. With the help of curve models, the sound absorption coefficient can be estimated according to the varying asphalt thickness value. The use of basic oxygen furnace slag as aggregate in the asphalt pavement mixture can increase the sound absorption performance not only at low frequencies but also at high frequencies. The increase in thickness of porous asphalt pavements can improve sound absorption performance at low frequencies.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 10.04.2022
Düzeltilme: 21.06.2022
Kabul: 29.08.2022

Keywords

Environmental Noise
Control
Sound Absorption
Coefficient
Porous Asphalt
Numerical Analysis

Anahtar Kelimeler

Çevresel Gürültü Kontrolü
Ses Yutma Katsayısı
Gözenekli Asfalt
Numerik Analiz

Gözenekli Asfalt Kaplamalarda Ses Yutma Katsayısının Modellenmesi: Kalınlık ve Karışım Oranı Örneği

Öz

Çevresel gürültünün insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle kontrol altında tutulması gerekir. Çevresel gürültü kontrolünde asfalt kaplamaların ses yutma performansı önemli bir parametredir. Asfalt kaplamadaki ses yutma performansının artırılması çevresel gürültü düzeyini azaltabilmektedir. Bu çalışmada asfalt kaplamalarda ses yutma katsayısının artırılması araştırılmıştır. Asfalt kaplama kalınlık değişimi veya asfalt kaplama karışım içeriği değişikliği ile ses yutma katsayısının artırılabilmesi gözlemlenmiştir. Araştırmada, gözenekli asfalt (poroz asfalt) kaplamaların ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları MATLAB programında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Agregat karışım oranlarında %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında bazik oksijen fırını cürufu agreganın asfalt kaplamada kullanılması araştırılmış ve farklı karışımlara ait asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı MATLAB programında modellenmiştir. Ayrıca, 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma performansları 1/3 oktav bant frekanslarına göre incelenmiş ve değişen asfalt kalınlıklarına göre ses yutma katsayısı eğri uyarlama yöntemi ile MATLAB programında modellenmiştir. Eğri modelleri yardımıyla, değişen asfalt kalınlık değerine göre ses yutma katsayısı öngörülebilir. Asfalt kaplama karışımında agregat olarak bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, sadece düşük frekans değerlerinde değil, aynı zamanda yüksek frekans değerlerinde de ses yutma performansını arttırabilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamadaki kalınlık artışı düşük frekanslardaki ses yutma performansını iyileştirebilmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çevresel gürültü kontrolünün sağlanması insan sağlığı açısından büyük öneme sahiptir. Daha iyi yaşam alanlarının elde edilmesi işitsel konfor koşullarının sağlanabilmesi ile elde edilmektedir. Aşırı gürültüye maruz kalındığı takdirde insan sağlığı olumsuz olarak etkilenebilmektedir. Bozkurt & Demirkale [1] çevresel gürültünün halk sağlığını dikkate değer düzeyde etkilediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, Dünya Sağlık Örgütü [2] hava kirliliğini insan sağlığını olumsuz etkileyen birinci çevresel etki olarak açıklamış ve çevresel gürültüyü de insan sağlığını olumsuz etkileyen ikinci çevresel etki olarak belirlemiştir. Bu kapsamda, çevresel gürültünün azaltılması için gerekli önlemlerin alınması elzemdir. Çevresel gürültü problemlerinin başında ulaşım gürültüsü gelmektedir. Ulaşım gürültüsü kara yolu, demir yolu ve havayolu araçları tarafından meydana gelmektedir. Ulaşım sistemlerinde yol üst yapısı olarak asfalt kaplama yüzeyler sıklıkla kullanılabilir ve asfalt kaplamalar özellikle kara yolu ulaşımında büyük bir kullanım alanına sahip olmaktadır.

Trafik gürültüsünün insan sağlığını olumsuz etkilediği literatür araştırmalarında da gözlemlenmektedir. Che vd. [3], trafik gürültüsünün rahatsızlıklara neden olabileceğini açıklamışlar ve şehir hastalıklarından biri olduğunu belirtmişlerdir. Kleiziené vd. [4], Avrupa’da trafik gürültüsünün insan sağlığını etkilediği ve her yıl en az 1 milyon insanda kardiyovasküler rahatsızlıklara sebep olduğunu açıklamışlardır. Gilani & Mir [5], aşırı trafik gürültüsünün uyku kalitesini azalttığını ve uyku kalitesini olumsuz etkilediğini açıklamışlardır. Bu nedenlerden dolayı, trafik gürültüsünün kontrol altında tutulması ve çevresel gürültü düzeyinin azaltılması gerekmektedir.

Çevresel gürültü düzeylerinin azaltılmasında etkili olan unsurlardan biri de zemin kaplamalarıdır. Sesin serbest alanda yayılması sırasında gerçekleşen ses basınç düzeyindeki azalmalar ISO 9613-2 standardında [6] açıklanmaktadır ve bu standartta zemin emiliminin artırılması durumunda alıcıya ulaşan ses basınç düzeylerinin azaldığı anlaşılmaktadır. Bozkurt [7], zemin yüzey kaplamalarındaki ses yutma performansının artırılmasının önemli olduğunu belirtmiş ve zemin kaplamalarının ses yutma performansı artırıldığı takdirde çevresel gürültü düzeyinin azalabileceğini açıklamıştır. Bu bakış açısı ile asfalt yüzey kaplamaları kent ölçeğinde önemli bir yüzey alanına sahip olmaktadır. Ayrıca, karayollarındaki araç hareketlerinin yol üst yapısının üzerinde gerçekleşiyor olması nedeniyle asfalt kaplamalar gürültü kaynağına çok yakın olarak konumlanabilmektedir. Bu kapsamda asfalt kaplamaların yansıtıcılık özelliğinin azaltılması çevresel gürültünün azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Kotzen & English [8], gürültü azaltma stratejisi olarak yollarda ses emici özelliğe sahip asfalt yüzey kaplamalarının kullanılabilirliğini, ses emici yüzey kaplamaları olarak gözenekli asfalt kaplamanın Avrupa’da sıklıkla kullanıldığını ve Hollanda otoyollarının %70’inden fazlasının gözenekli asfalt kaplama ile kaplandığını belirtmişlerdir. Gözenekli asfalt kaplama aşınma tabakasında kullanılmaktadır ve literatürde gürültü azaltma stratejilerinden birinin gözenekli asfalt (poroz asfalt) kullanmak olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada da gözenekli asfalt sistemleri incelenmiştir. Asfalt yüzey kaplamalarının ses yutma katsayısının artırılması önemli bir gürültü azaltma stratejisidir. Barros vd. [9], gözenekli asfalt tipinin kullanılmasıyla, gürültüye maruz kalmada 2,8 dB’lik bir azalmanın tespit edildiğini belirtmişlerdir. Chen vd. [10], trafik gürültüsünü azaltmak için gözenekli asfalt kaplamanın kullanılabilirliğini açıklamıştır. Chu & Fwa [11], gözenekli asfalt kaplamaların birçok gelişmiş ülkede araç lastik gürültüsünü azaltmak için kullanıldığını ve akustik iyileştirme amacıyla pek çok uygulamalarda kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Bozkurt [7], yol kaplamalarının çevresel gürültünün azaltılmasında önemli bir parametre olduğunu açıklayarak, akustik özellikleri iyileştiren malzeme bazlı araştırmaların çok geniş bir araştırma konusu olduğuna değinmiştir. Sonuç olarak, gözenekli asfalt kaplama tipinin çevresel gürültüyü azaltmak için bir strateji olarak kullanılabilirliği görülmektedir.

Literatürde gözenekli asfalt kaplamanın ses yutma performansının yüksek olabileceği belirtilmiştir ve asfalt tabakasının gözeneklilik oranının ve hava boşluk oranının ses yutma performansını etkileyebileceği anlaşılmıştır. Wang vd.’nin çalışmasında [12], gözenekli asfalt betonunda ses yutma katsayısını artırmak için idealleştirilmiş gözenek yapısı parametreleri (gözenek yarıçapı, gözenek uzunluğu ve gözeneklilik oranı) araştırılmıştır. Gözenek yarıçapını değiştirmeden gözeneklilik oranı arttığında, 100 Hz ile 400 Hz arasındaki frekans aralığındaki ses yutma katsayısının artabileceğini göstermişlerdir. Liu vd. [13] ve Zhang vd. [14] tarafından asfalt kaplamalarındaki ses yutma performansı araştırılmış, hava boşluk oranının ses yutma katsayılarını etkileyebileceği belirtilmiş ve hava boşluk oranını artmasıyla ses yutma katsayılarının da

artabileceği gösterilmiştir. Kalauni & Pawar [15] araştırmalarında gözenekli asfalt yüzey kaplaması hakkında açıklamalar yapmışlar ve gözenekli asfaltın gözenekleri sayesinde gürültü azaltımı için kullanılabilirliğini açıklamışlardır. Gao vd. [16], gözenekli asfalt numunelerinin ses yutma katsayısının ölçülen hava boşlukları ile iyi bir doğrusal korelasyona sahip olduğunu ve hava boşluk oranı arttığında genel olarak ses yutma performansının da arttığını göstermişlerdir. Mikhailenko vd. [17], ses emiliminin en çok hava boşluğu içeriğinden (gözeneklilik oranından) etkilenecek şekilde davrandığını açıklamışlardır. Literatür çalışmalarında ses yutma performansı üzerinde gözeneklilik özellikleri ve hava boşluk oranının etkili olduğu görülmektedir.

Yol üstünde suyun birikmemesi ve suyun drenajının sağlanabilmesi için de gözenekli asfalt kaplamaların kullanılabilirliği görülebilmektedir. Yağmurlu günlerde, asfalt kaplamaların üzerinde biriken suyu uzaklaştırabilmek amacıyla gözenekli asfalt sisteminin kullanılması faydalı olabilmektedir. Suyun asfaltta birikmemesi ve doğrudan alt katmanlara iletilmesi sürüş güvenliğini de olumlu yönde etkileyebilmektedir. Alber vd. [18], gözenekli asfalt tasarımının iyi drenaj sistemine sahip olması nedeniyle tercih edildiğini belirtmişlerdir. Chu & Fwa [19], kayma direncini artırmak için gözenekli asfalt kaplamaların kullanıldığını vurgulamışlardır. Bu kapsamda, poroz asfaltın suyu drene etme özelliği sayesinde, yağışlı havalarda, gözenekli asfalt kaplama yüzeylerin su ile kaplanması önlenmektedir. Suyun gözenekli asfalt kaplama yüzeyinde toplanmaması, yolun daha güvenli olmasına ve sürüş konforuna katkı sağlamaktadır. Ayrıca gözenekli asfalt kaplamanın kullanılması, suyun zararlı etkilerinin yol açtığı problemlere çözüm sunabilmektedir. Özellikle de soğuk havalarda donma, çözülme ve benzeri sorunlar bu doğrultuda önenebilecektir. Gözenekli asfalt kaplamanın kullanılması, suyun yol açtığı nem hasarı, çatlak oluşumu, yorulma gibi servis ömrünü olumsuz yönde etkileyen unsurlar azaltılabilecektir. Dolayısıyla, yol ve sürüş güvenliği açısından gözenekli asfalt kaplamanın kullanımı çok önemli bir tercih sebebi olarak karşımıza çıkmaktadır.

Shen vd. [20], gözenekli asfalt karışımında bazik oksijen fırını cürufun agrega yerine kullanılmasını araştırmışlardır ve ses yutma katsayısına olan etkisini deneysel araştırma ile incelemişlerdir. Bazik oksijen fırını cürufu malzemesinin, çelik üretim prosedüründeki işlenmiş demir üretimi sırasında elde edildiği belirtilmiştir. 1 ton dökme çelik üretim aşamasında 300 kg bazik oksijen fırını cürufu elde edildiği, 1 ton ham çelik üretiminde 130 kg bazik oksijen fırını cürufu elde edildiği belirtilmiştir. Çelik üretim sürecinden arta kalan bazik oksijen fırını cürufu, yol kaplamasında agrega olarak kullanılabilir. Çelik üretim sürecinden arta kalan malzemelerin kullanılması sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm açısından da büyük önem arz etmektedir. Bitümlü sıcak karışım üretim prosedüründe kullanılan bazik oksijen fırını cürufu geri dönüşümünün, asfalt kaplamanın performans özelliklerini iyileştirdiği, bu bağlamda da stabilite ve kayma direnci dayanımı gibi özellikleri artırdığı görülmüştür. Ayrıca, doğal agregalara göre gözenekli yapısı yüzünden daha yüksek ses emilimine sahip olduğu belirtilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamalar sadece suyun drenajını sağlamakla kalmayıp yol yüzeyinde trafik gürültüsünü azaltabildiği ek olarak açıklanmıştır.

Bu çalışmada, Shen vd.'nin [20] çalışmasında sunulan deneysel ölçüm sonuçlarının incelenmesi gerçekleştirilmektedir. Farklı oranlardaki bazik oksijen fırını cüruf karışımlarının gözenekli asfaltı üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Ayrıca değişen asfalt kalınlığına göre değişen ses yutma performansı incelenmiştir. Shen vd.'nin [20] araştırmasındaki deney ölçüm sonuçları bu çalışmada kullanılmış, ölçüm sonuçları numerik olarak MATLAB programında modellenmiş ve modeller üzerinden ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları analiz edilmiştir.

2. MALZEMELER VE YÖNTEMLER (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada kullanılan agregalar Shen vd.'nin araştırmasında [20] açıklanmış, iri dane boyutuna sahip olacak şekilde bazik oksijen fırını (BOF) cürufu agregalar ticari amaçlı çelik fabrikasından ve kırma taş agregalar da dere malzemelerinden elde edilmiştir. Polimer modifiyer olarak karışımında kullanılan SBS (styrene-butadiene-styrene) katkı asfalt binderin, ticari amaçlı satış yapan asfalt üreticilerinden tedarik edildiği çalışmada belirtilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan agrega ve katkı malzemelerinin fiziksel ve mekanik gibi mühendislik özellikleri açıklanarak gözenekli asfaltta kullanılabilirliği belirtilmiştir [20].

Hacimsel olarak agrega yerine kullanılan bazik oksijen fırını cürufunun (%0, %25, %50, %75, %100 oranlarında olmak üzere) beş farklı karışım oranında gözenekli asfalt kaplamalarda kullanılması

incelenmiştir. Tüm karışımlarda maksimum agrega dane boyutu 19 mm olarak belirtilmiştir. Japonya yol birliği tarafından açıklanan optimum asfalt içeriği tasarlanması prosedürleri gözenekli asfalt karışımların hazırlanmasında kullanılmıştır. Ayrıca, gözenekli asfalt karışımında kullanılan SBS polimer katkı malzemesinin, modifiyer olarak karışımda kullanılmasının ilgili şartnamede belirtilen standart limitlerini karşıladığı belirtilmiştir [20]. Shen vd. çalışmalarında farklı bazik oksijen cürufu oranlarında hazırlanan SBS katkılı gözenekli asfalt karışımlar Marshall test metodu kullanılarak hazırlanmış, özgül ağırlık, optimum bitüm oranları, stabilite ve akma değerleri elde edilmiştir [20]. Değişik fırın cürufu oranında hazırlanan SBS modifiye asfalt karışımlarda kullanılan BOF cüruf ve kırma taş agregaların özellikleri Tablo 1 verilmiştir. Aşınma tabakasında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1 sunulmuştur. Agrega özelliklerinin AASHTO M283 ve ASTM D692 şartname standart limitlerini sağladığı görülmüştür. Agrega gradasyonu Şekil 2a'da gösterilmiştir. Agrega karışımı gradasyonu AASHTO T27 ve ASTM C136 standartları dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Polimer modifiyeli asfalt bağlayıcılar gözenekli asfalt karışımlarında geniş ölçüde karışım dayanıklılığını ve sökülme direncini arttırmak için kullanılmaktadır. SBS polimer modifiye asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir. BOF cürufu SBS modifiye gözenekli asfalt karışımların farklı BOF oranındaki mühendislik özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir [20]. Sonuçlar göstermektedir ki BOF cüruf, açılma şekli ve pürüzlü yüzeyi sayesinde asfalt binder ile mükemmel bir bağ kurmaktadır. BOF cüruf karışımı, benzer sebeplerle kırma taş karışımlarına göre yüksek Marshall stabilitesine sahiptir.

Tablo 1. BOF cüruf ve kırma taş agreganın özellikleri [20]

| Özellikler | BOF cüruf | Kırma taş | Şartname limiti |
|---|-----------|-----------|-----------------|
| Los Angeles Aşınma oranı, % | 20.96 | 23.52 | 40 max. |
| Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (NaSo4), % | 1.35 | 3.16 | 12 min. |
| Yassılık indeksi | 0.60 | 0.52 | - |
| Su Emme % | 2.2 | 1.3 | - |
| Kırık yüzey oranı, % | | | |
| Bir veya daha fazla | 100 | 100 | 90 min. |
| İki veya daha fazla | 95 | 92 | 75 min. |
| Agrega özgül ağırlıkları, t/m ³ (4,75mm elek boyu) | 3,49 | 2,67 | - |

Tablo 2. SBS modifiyeli bitüm fiziksel özellikleri [20]

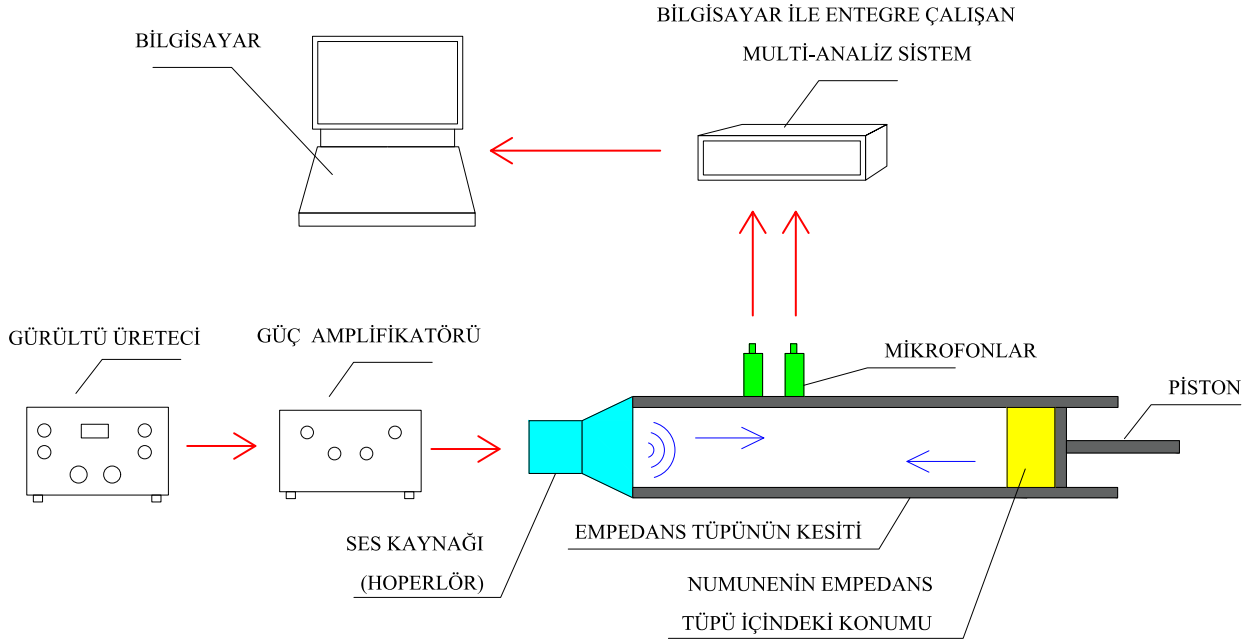
| Özellikler | Spesifikasyon | Test edilmiş |
|---|---------------|--------------|
| Özgül ağırlık (g/cm ³) | - | 1.034 |
| Penetrasyon (25 C ⁰ , 1/10 mm) | 35 Min | 42 |
| Viskozite (60 C ⁰ , denge(poise)) | 8000 Min | 8753 |
| Viskozite (135 C ⁰ , cSt) | 3000 Max | 2850 |
| Alev alma noktası | 232 Min | 297 |

Tablo 3. Modifiye katkılı gözenekli asfalt karışımların mühendislik özellikleri [20]

| Karışım özellikleri | Şartname Limitleri | BOF cüruf oranı (%) | | | | |
|------------------------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|------|
| | | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Opt. Asfalt İçeriği-(%) | - | 5.50 | 5.55 | 5.60 | 5.64 | 5.75 |
| Stabilite (kN) | 3.5 Min | 4.19 | 4.74 | 5.10 | 5.33 | 5.36 |
| Akma (0,01 cm) | 20-40 | 34.5 | 35.2 | 35.8 | 34.8 | 34.6 |
| Hava Boşluğu (%) | 20 ± 1% | 20.2 | 19.7 | 20.5 | 20.8 | 20.7 |
| Birim ağırlık (kg/m ³) | - | 2065 | 2125 | 2207 | 2281 | 2348 |
| Su gideri (%) | 0.3 Max | 0.16 | 0.18 | 0.21 | 0.15 | 0.20 |
| Geçirgenlik (cm/s) | 0.01 Min | 0.34 | 0.38 | 0.32 | 0.35 | 0.37 |

Ses yutma katsayısı ölçümü için literatürde iki temel yöntem kullanılmaktadır. İlk yöntemde ses yutma katsayısı ölçümleri ISO 354 standardı [21] doğrultusunda çınlama odasında ölçülmektedir. Çınlama odası ölçümlerinde yaygın yansıma ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları elde edilir. Literatürde kullanılan diğer ses yutma katsayısı ölçüm yöntemi ISO 10534-2 standardı [22] doğrultusunda gerçekleştirilen empedans tüpü yöntemidir. Empedans tüpü yönteminde dikey doğrultulu gelen sesin ses yutma katsayısı ölçülür. Çınlama odasında elde edilen yaygın yansıma ses yutma katsayısı ölçümleri empedans tüpü ile elde edilen dikey yansıma ses yutma katsayısı ölçümlerinden genellikle daha fazladır [23]. Çınlama odasında elde edilen ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları empedans tüpü ölçüm sonuçlarına göre daha güvenlidir çünkü

ölçümü gerçekleştirilen malzemenin alanı ve miktarı fazladır. Ancak empedans tüpü ölçümleri yardımı ile farklı numunelerin kıyaslanması çok az malzeme miktarı ile pratik olarak gerçekleştirilebilmektedir. Empedans tüpü yöntemi ile ses yutma ölçümleri çok hızlı bir şekilde ve az maliyetli olacak şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sebepten dolayı çok farklı tiplerdeki malzemelerin karşılaştırılması yapılırken genellikle empedans tüpü ölçüm yönteminin kullanıldığı literatürde gözlemlenmektedir. Shen vd.'nin çalışmasında [20], da ses yutma katsayısı ölçümleri ASTM E1050 standardı [24] (ISO 10534-2 standardı Avrupa'da kullanılmakta olup benzeri Amerika'da ASTM E1050 standardı olarak tanımlanmıştır) doğrultusunda empedans tüpünde gerçekleştirilmiştir. Pulse multi analiz sistemi kullanılmış ve 10 cm çapındaki empedans tüpü ile ses yutma katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler Marshall çekici yardımı ile 98 mm çapında üretilmiştir. Empedans tüpü içerisindeki iç duvar ile numune arasında oluşabilecek boşluğu önlemek amacıyla numunelerin etrafı sıkıca teflon tarzı bir malzeme ile kaplanmıştır. Şekil 1'de empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçümüne ait akış şeması verilmiştir. Empedans tüpü ses yutma katsayısı ölçümlerinde gürültü üretici ve sonrasında güç amplifikatörü kullanılarak empedans tüpü içerisindeki ses kaynağı çalıştırılmıştır. Empedans tüpü içerisine yerleştirilen numunedan yansıyan ses ve hoparlörden gelen ses dalgalarının oluşturduğu basınç değişiklikleri iki farklı mikrofon yardımıyla ölçülmüştür. Bilgisayar ile entegre çalışan multi-analiz sistemi ile frekanslara göre ses yutma katsayısı ölçümleri elde edilmiştir. Ses yutma katsayısı ölçümleri farklı tip numune kalınlığına bağlı olarak sırasıyla 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm olacak şekilde empedans tüpü sistemi içerisinde ölçülmüştür [20].



Şekil 1. Empedans tüpü ölçüm süreci ve empedans tüpünün kesiti [20]

Gözenekli asfalt kaplamaların frekanslara göre ses yutma performansının değişimi araştırılmıştır. Gözenekli asfalt tabakası için yüksek ses yutma performansının elde edildiği frekans aralıkları literatür çalışmalarında incelenmiştir. Li vd. [25], gözenekli asfalt kaplamalarının 800 Hz ile 1600 Hz arasındaki frekans aralığında ses yutma performansının yüksek olabildiğini belirlemişlerdir. Vaitkus vd. [26], gözeneklilik artışının yüksek frekanslardaki (1000 Hz üzeri) lastik/yol gürültüsünün azaltılmasına katkı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Vaitkus vd. [27], asfalt beton, taş mastik asfalt ve gözenekli asfalt olmak üzere üç farklı asfalt tipini araştırmışlardır. Araştırmalarında optimal bağlayıcı içeriği kullanılarak, 600 ile 2000 Hz arasındaki frekanslarda, gözenekli asfalt kaplama tipinden maksimum ses yutma performansı elde edilmiştir. Ding & Wang [28], çalışmalarında gözeneksiz ve gözenekli kaplama yüzeyleri üzerindeki ses basınç seviyelerinin araştırdılar ve gözenekli asfalt kaplama tipinin genellikle yüksek frekanslardaki lastik kaplama gürültüsünü azalttığını gösterdiler. Gözenekli asfalt kaplamalarda düşük frekanslarda yüksek ses yutma performansının elde edilemediği literatür çalışmalarında görülebilmektedir. Gözenekli asfalt kaplamalarda düşük frekans verimini artırmak için katman kalınlığının değiştirilmesi veya katkı maddeleri kullanılarak karışım içeriğinin değiştirilmesi gerekebilir.

Asfalt kaplamanın karışım içeriği değiştirilerek ses yutma katsayısının iyileştirilebileceği literatür araştırmalarında gözlemlenebilmektedir. Agregası türü ve agregası tane boyutu, asfalt kaplamalarda ses yutma performansı üzerinde etkilidir. Gardziejczyk vd. [29], maksimum 5 mm parçacık boyutuna sahip bir agregası içeren poroelastik asfalt karışımının, maksimum agregası parçacık boyutu 8 mm olan karışımlardan daha iyi akustik özellikler ile karakterize edilebildiğini belirtmişlerdir. Kolodziej vd. [30], iki farklı agregası boyut aralığını araştırmışlar ve agregası boyut aralığı değiştiğinde ses yutma katsayısının artabileceğini göstermişlerdir. Agregası tipini değiştirmek veya agregası maksimum dane boyutunu (8 mm'den 5 mm'ye) azaltmak, ses yutma katsayısını iyileştirebilmektedir. Asfalt karışımına ilave edilen katkı malzemesi ile ses yutma katsayısının iyileştirilebileceği literatürde görülebilmektedir. Bu bağlamda kırıntı kauçuk katkı malzemesinin sıklıkla kullanıldığı anlaşılmaktadır. Morcillo vd. [31], ömrünü tamamlamış lastiklerden gelen kırıntı kauçukların ve plastik atık malzemelerin katkı malzemesi olarak kullanıldığı takdirde asfalt kaplamaların akustik özelliklerinin iyileştirebileceğini belirtmişlerdir. Mavridou & Kehagia [32] tarafından yapılan çalışmada, kauçuk katkılı asfalt kaplamaların çevresel gürültü düzeyini yaklaşık olarak 1-3dB azaltabileceğini açıklamışlardır. Vazquez vd. [33] asfalt kaplamanın ses emilimini iyileştirmek için kırıntı kauçuk ilavesini araştırmışlardır. Kırıntı kauçuk katkısı içeren asfalt karışım tipi ile kırıntı kauçuk katkısı içermeyen normal asfalt karışım tipi karşılaştırılmıştır. Araştırmada, kırıntı kauçuk katkı maddelerinin 200 Hz ile 500 Hz arasındaki frekans aralığındaki ses yutma performansını arttırdığını belirtmişlerdir. Kırıntı kauçuk katkı malzemesinin 200 Hz'in üzerindeki frekansların ses yutma katsayısını artırdığı görülmektedir. Asfalt karışımlarında katkı malzemesi olarak liflerin de kullanıldığı literatürde anlaşılmaktadır. Wang vd. [34], asfalt kaplamada bazalt elyaf katkısının kullanılmasının ses yutma katsayısına olan etkisini incelemişler ve bazalt elyaf katkı malzemesinin kullanılmasıyla asfalt kaplamalardaki ses yutma performansının artırdığını açıklamışlardır. Gözenekli asfalt kaplamalarda, ses yutma katsayısının asfalt kaplamanın kalınlığına bağlı olarak değişebildiği gözlemlenebilmektedir. Asfalt kaplamanın kalınlığı arttırıldığı takdirde ses yutma katsayısı da artabilmektedir. Özellikle düşük frekanslardaki ses yutma katsayısının arttırılması istendiğinde asfalt kalınlığını arttırmak iyi bir metot olarak kabul edilebilir. Chu vd.'nin [35], Wang vd.'nin [36] ve Peng vd.'nin [37] çalışmalarında asfalt tabaka kalınlığı arttırdığında düşük frekanslardaki ses yutma performansının arttığı anlaşılmaktadır.

Asfalt kaplama dışındaki ulaşım yollarında kullanılan farklı kaplama tiplerinin ses yutma performansının araştırıldığı görülmektedir. Bu kapsamda, harç karışımı ile üretilen malzemeler üzerinde yapılan araştırmaları da dikkate almak faydalı olabilmektedir. Zhao vd. [38], demiryollarında kullanılan gözenekli ses emici beton levhaları araştırmış ve çevresel gürültüyü azaltmak için ses yutma katsayısını analiz etmiştir. Ses yutma katsayısını arttırmak amacıyla farklı agregası tane boyutları araştırılmıştır ve çok ince agregası aralığı kullanılmasının ses yutma katsayısını olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir. Çalışmada, hafif agregası tipinin veya polipropilen lif katkı maddesinin kullanılması ile ses yutma katsayısının arttırılabileceği açıklanmıştır. Oancea vd. [39], farklı atık malzemeleri katkı malzemesi olarak kullanmış ve sürdürülebilir betonun ses yutma özelliklerini araştırmışlardır. Polistiren granülleri, polietilen tereftalat granülleri, mısır koçanı granülleri, kıyılmış ayçiçeği sapı ve koyun yününden yapılmış toprakları içeren beş farklı sürdürülebilir beton türü incelenmiştir. Oancea vd., sürdürülebilir betonların her birinin genel anlamda şehirlerdeki geleneksel betonlardan daha yüksek ses yutma performansına sahip olduğunu açıklamışlardır. Gürültü problemlerini ve atık malzemeleri azaltmak için sürdürülebilir beton türlerinin kullanılabileceğini tanımlamışlardır. Ses yutma katsayılarını arttırmak için literatürde farklı harç karışımı araştırmaları da bulunmaktadır. Bozkurt & Demirkale [40] tarihi sıvaların ses yutma özelliklerini araştırmıştır. Bu doğrultuda, hidrolik kireç ve dere kumu agregası ile hazırlanan harçların ses yutma özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmada, bağlayıcı oranın arttırılmasının veya çok küçük agregası dane boyutu kullanılmasının ses yutma katsayısını olumsuz etkileyebileceği gösterilmiştir [41]. Ketten lifi katkısının veya kırıntı kauçuk katkısının harç karışımında kullanılması ile ses emilimini arttırabileceği gösterilmiştir [41,42,43]. Ayrıca harç karışımında hafif agregası türü kullanımının ses yutma katsayısını arttırabileceği vurgulanmıştır [42,43].

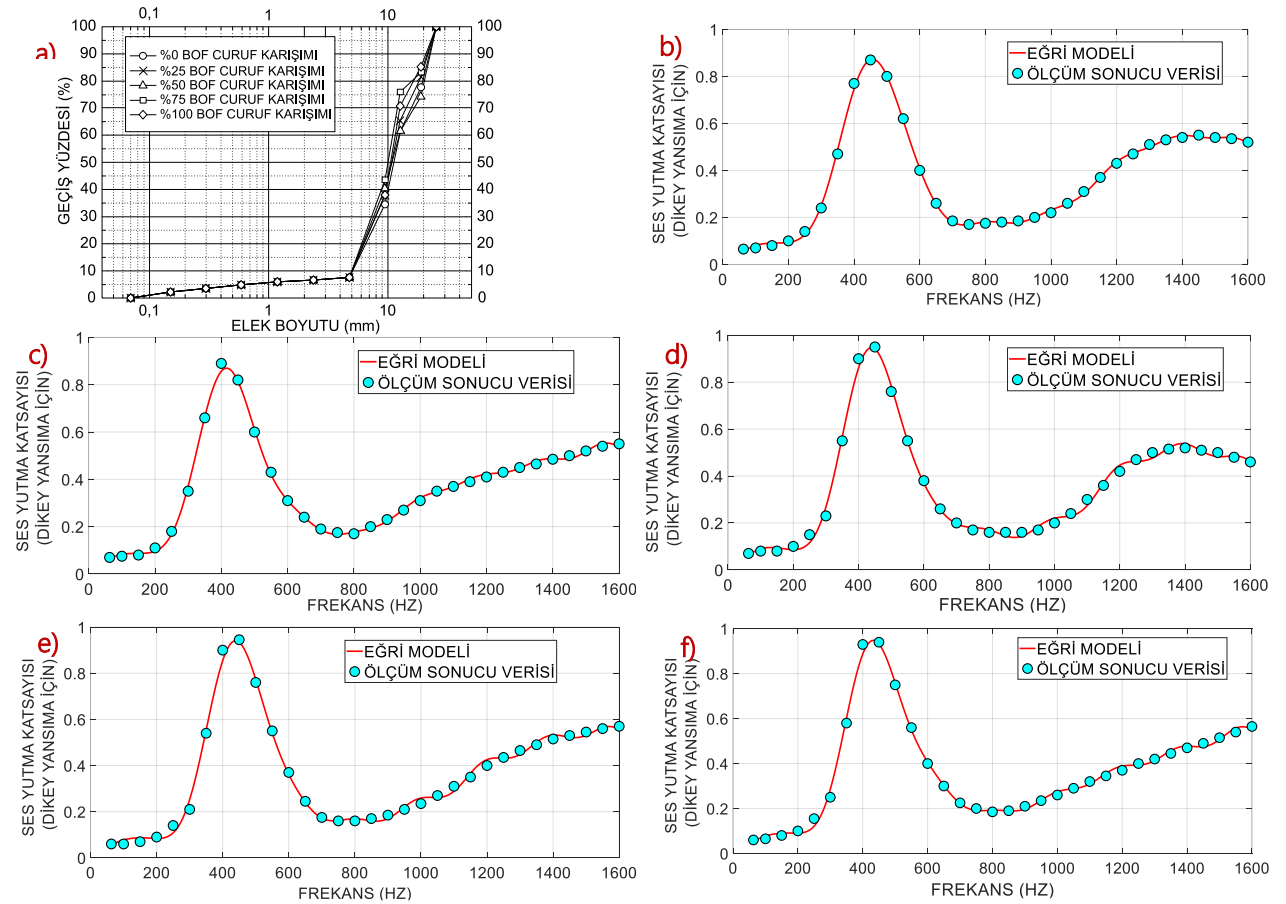
Bu araştırmada, Shen vd.'nin [20] ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları alınarak numerik model analizinde kullanılmıştır ve gözenekli asfalt kaplamalarda karışım oranı değişiminin ve kalınlık değişiminin ses yutma katsayısına olan etkisi numerik olarak MATLAB R2020b programında modellenmiştir.

3. NUMERİK MODEL ANALİZLERİ (NUMERICAL MODEL ANALYSIS)

Shen vd.'nin [20] asfalt kaplama üzerine gerçekleştirdiği ölçüm sonuçları makalede verilen grafiklerden yaklaşık olarak alınmıştır ve ses yutma katsayısı sonuçları doğrultusunda MATLAB programında numerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Datalara ait bilgiler (ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları, asfalt kalınlığı, frekans değerleri) MATLAB programına metin belgesi (txt formatında) içerisinde aktarılmıştır. Asfalt kaplamalarda 10 cm, 6,35 cm ve 3 cm kaplama kalınlıkları analiz edilmiştir. Bu bölümde ses yutma katsayısının numerik olarak modellenmesi açıklanmaktadır. Asfalt kaplamada kullanılan agrega oranları doğrultusunda modelleme eğrileri hazırlanmış ve agrega içeriğinde kullanılan hacimsel olarak bazik oksijen fırını cürufu agrega oranına göre grafikler değerlendirilmiştir. Değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant frekanslarında eğri modelleri hazırlanmış ve değişen kalınlıklara göre analizler yürütülmüştür.

3.1. 10 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 10 Cm Thickness Asphalt Pavements)

63 Hz ile 1600 Hz arasındaki 32 noktanın ses yutma katsayısı ölçüm sonucu doğrultusunda eğri uyarlama yöntemi kullanılmış, sin8 numerik modelleme yöntemi seçilmiş ve eğri modelleri elde edilmiştir. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada, hacimsel olarak agregada kullanılan bazik oksijen cürufu oranlarına göre elde edilen model eğrileri Şekil 2 'de sunulmaktadır. Tablo 4'de 10 cm'lik asfalt kaplama için MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri tanımlanmıştır. Farklı bazik oksijen cürufu oranlarına göre tanımlanan formüller ilgili frekans değerindeki ses yutma katsayısını yaklaşık olarak hesaplanmasına yardımcı olabilecektir.

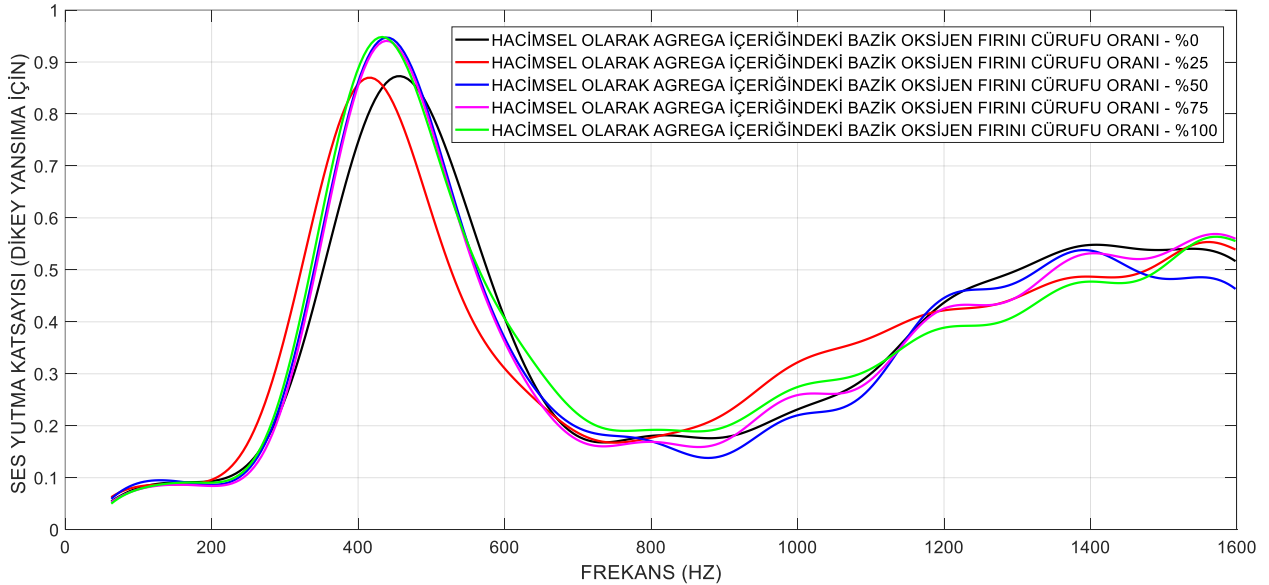


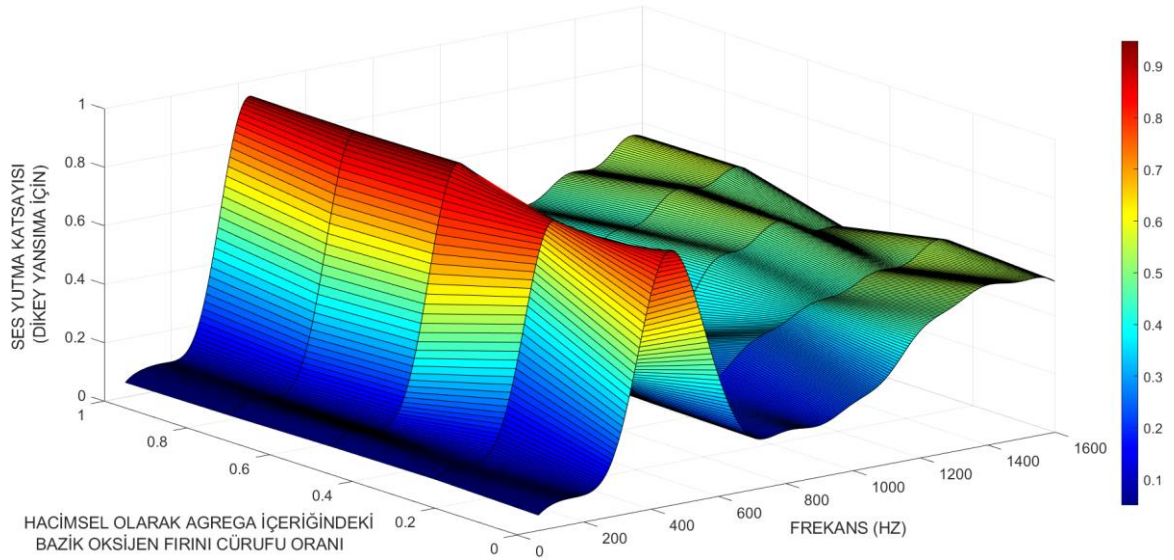
Şekil 2. Agrega gradasyonları ve 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega olarak kullanılan bazik oksijen fırını cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) Agrega gradasyonları, b) %0, c) %25, d) %50, e) %75, f) %100

Tablo 4. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agreganın içeriğindeki bazik oksijen firını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

| Oran Yüzdesi | Fonksiyon Denklemi |
|--------------|--|
| %0 | $P(x) = 0,6991\sin(0,002102x-0,6144) + 0,4618\sin(0,003929x+0,7799) + 0,1497\sin(0,008473x-2,555) + 0,1158\sin(0,01277x+1,747) + 0,08506\sin(0,01629x+0,6224) + 0,03464\sin(0,02134x-2,154) + 0,01689\sin(0,02413x-2,317) + 0,007799\sin(0,03269x+0,2452)$ |
| %25 | $P(x) = 1,101\sin(0,001514x-0,6862) + 0,7034\sin(0,002946x+1,11) + 0,1838\sin(0,008201x-1,708) + 0,1214\sin(0,01388x+1,295) + 0,09399\sin(0,01689x+1,242) + 0,04044\sin(0,02174x-0,8483) + 0,01984\sin(0,02675x-3,001) + 0,01386\sin(0,03191x+1,224)$ |
| %50 | $P(x) = 0,6296\sin(0,002103x-0,5178) + 0,4037\sin(0,004084x+0,699) + 0,164\sin(0,008176x-2,327) + 0,09744\sin(0,01626x+0,695) + 0,1152\sin(0,01241x+2,097) + 0,05156\sin(0,02056x-1,047) + 0,02907\sin(0,02451x-2,496) + 0,01634\sin(0,0327x+0,4006)$ |
| %75 | $P(x) = 0,8967\sin(0,001677x-0,648) + 0,6053\sin(0,003216x+1,027) + 0,1866\sin(0,008471x-2,327) + 0,1309\sin(0,0132x+1,704) + 0,08557\sin(0,01687x+0,6049) + 0,04675\sin(0,02199x-2,014) + 0,01874\sin(0,03265x+0,4477) + 0,02851\sin(0,02467x-2,138)$ |
| %100 | $P(x) = 1,198\sin(0,001508x-0,7335) + 0,8099\sin(0,002961x+1,027) + 0,1856\sin(0,008477x-2,162) + 0,1313\sin(0,01397x+1,094) + 0,09601\sin(0,01709x+0,8467) + 0,03971\sin(0,02216x-1,46) + 0,02147\sin(0,02685x-3,329) + 0,01879\sin(0,03212x+0,9207)$ |

Şekil 3’de 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların MATLAB programında üretilen ses yutma katsayısı numerik model eğrileri verilmektedir. Şekil 3’deki numerik model eğrileri incelendiğinde, agreganın karışımında bazik oksijen cürufu kullanıldığında düşük frekansların ses yutma performansının artırılabilirdiği anlaşılmaktadır. Özellikle agreganın karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılması 63 Hz ile 500 Hz arasındaki frekansların ses yutma performansını arttırabilmektedir. Agreganın karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılması 500 Hz ile 600 Hz arasındaki ve 1250 Hz ile 1500 Hz arasındaki ses yutma performansını düşürebildiği numerik model eğrilerinden anlaşılmaktadır. Şekil 4’de numerik model eğrilerinin birleştirilmesi sonucu MATLAB programında elde edilen 3 boyutlu ses yutma grafiği bulunmaktadır. 3 boyutlu ses yutma grafiğinde agreganın karışımındaki bazik cüruf oranının ses yutma katsayısını önemli düzeyde etkileyebildiği anlaşılmaktadır. Agreganın karışımında bazik oksijen firını cürufunun oranı arttıkça maksimum emilimin gözlemlenebildiği tepe noktaları artabilmektedir. 10 cm’lik asfalt kaplamada agreganın karışımında bazik oksijen firını cürufunun kullanılması genel anlamda ses yutma performansını arttırabilirdiği anlaşılmaktadır. Agreganın içeriği değiştirilerek ses yutma katsayısı iyileştirilebilmektedir.

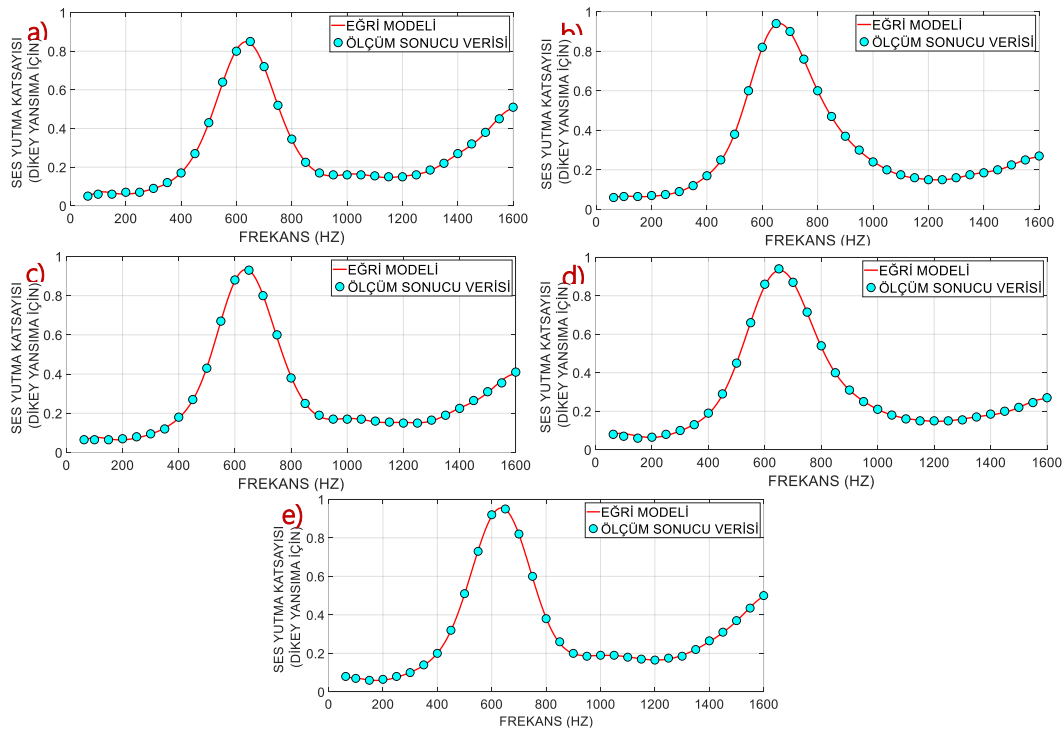
**Şekil 3.** 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri



Şekil 4. 10 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların karışım oranına göre üç boyutlu ses yutma katsayısı grafiği

3.2. 6,35 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 6,35 Cm Thickness Asphalt Pavements)

Eğri uyarlama yöntemi kullanılmış, 32 ölçüm sonucu doğrultusunda analiz gerçekleştirilmiş, sin8 nümerik modelleme yöntemi MATLAB programına girilmiş ve 63 Hz ile 1600 Hz arasında olan eğri modelleri elde edilmiştir. 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada, hacimsel olarak agregada kullanılan bazik oksijen cürufu oranlarına göre elde edilen model eğrileri Şekil 5 'de verilmektedir. MATLAB programında, eğri modellerinin güvenilirlik oranının %95 olduğu görülmüştür. Tablo 5'de 6,35 cm'lik asfalt kaplama için MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri tanımlanmıştır.

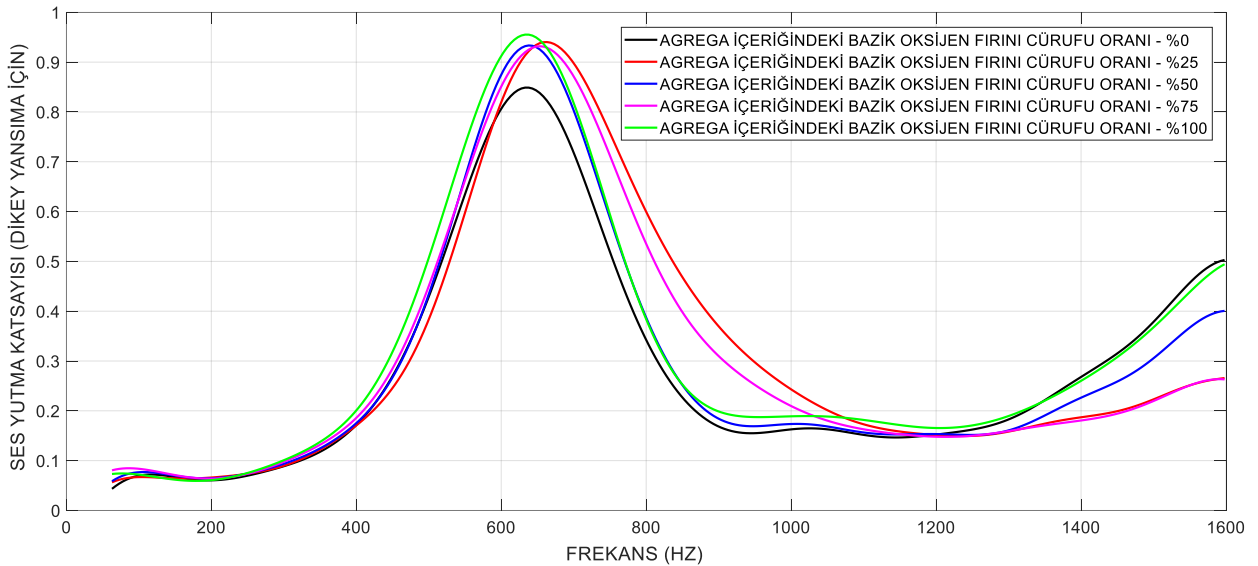


Şekil 5. 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agregada kullanılan bazik oksijen fırın cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) %0, b) %25, c) %50, d) %75, e) %100

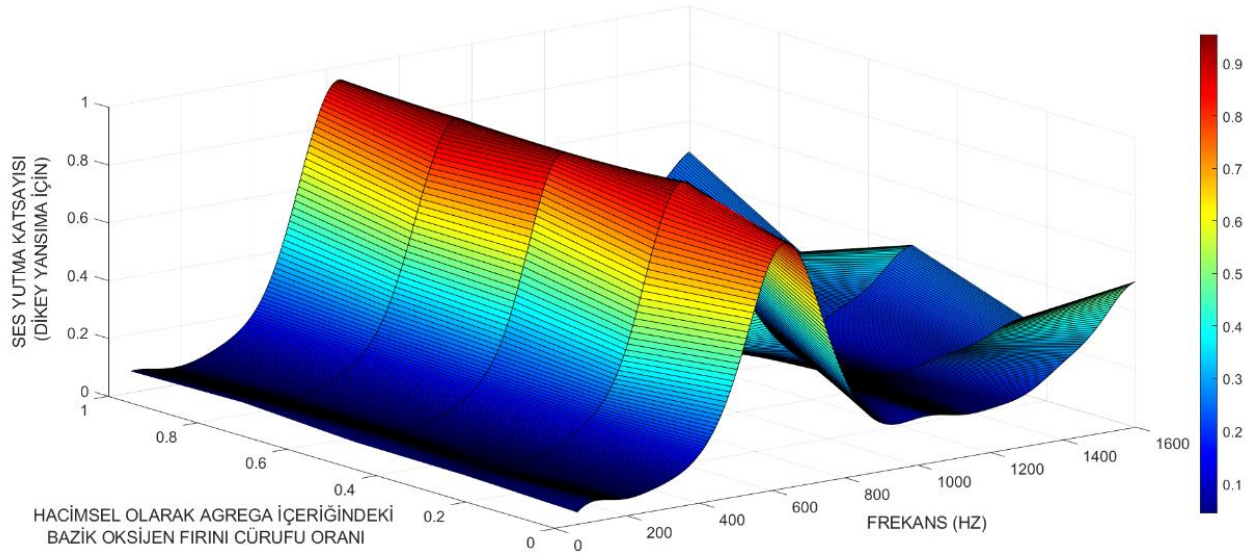
Tablo 5. 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agregada içeriğindeki bazik oksijen fırını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

| Oran Yüzdesi | Fonksiyon Denklemi |
|--------------|--|
| %0 | $P(x) = 0,4668\sin(0,001841x-0,449) + 0,167\sin(0,00805x+2,363) + 0,1342\sin(0,01227x+0,2608) + 0,2754\sin(0,004066x-0,09212) + 0,02754\sin(0,02056x+0,8272) + 0,04427\sin(0,01686x-2,945) + 0,01234\sin(0,02485x-1,231) + 0,00558\sin(0,0325x-0,2715)$ |
| %25 | $P(x) = 0,5383\sin(0,001998x-0,5581) + 0,1783\sin(0,008237x+1,635) + 0,05249\sin(0,01697x-3,506) + 0,136\sin(0,01121x+0,7523) + 0,0277\sin(0,0212x+0,5875) + 0,3267\sin(0,003918x-0,2053) + 0,01019\sin(0,02705x-3,344) + 0,003921\sin(0,03237x+0,3527)$ |
| %50 | $P(x) = 0,4975\sin(0,001906x-0,5353) + 0,1772\sin(0,00827x+2,154) + 0,1453\sin(0,01208x+0,3775) + 0,05703\sin(0,01678x-3,063) + 0,03326\sin(0,02066x+0,8461) + 0,325\sin(0,00388x-0,03949) + 0,01275\sin(0,02509x-1,534) + 0,006199\sin(0,03232x+0,211)$ |
| %75 | $P(x) = 0,5201\sin(0,002183x-0,4038) + 0,196\sin(0,008264x+1,994) + 0,1241\sin(0,01215x+0,2435) + 0,04473\sin(0,01814x-4,521) + 0,02793\sin(0,01964x+2,258) + 0,2212\sin(0,004257x-0,2694) + 0,007856\sin(0,0246x-1,72) + 0,002057\sin(0,02762x+2,416)$ |
| %100 | $P(x) = 0,4839\sin(0,00196x-0,2) + 0,1953\sin(0,007695x+2,556) + 0,1615\sin(0,01202x+0,4719) + 0,2028\sin(0,004716x-0,4329) + 0,02572\sin(0,01974x+1,759) + 0,05366\sin(0,01727x-3,403) + 0,01203\sin(0,02446x-1,472) + 0,001906\sin(0,03035x+0,7405)$ |

Şekil 6'da MATLAB programında 6,35 cm asfalt kaplama için türetilen model eğrileri sunulmuştur. Sin8 eğri uyarılama yöntemi ile üretilen model eğrileri 63 Hz ile 1600 Hz arasındaki ses yutma performansı hakkında bilgi sunmaktadır. Agregada karışımında bazik oksijen cürufunun bulunması ses yutma performansını genel anlamda arttırdığı anlaşılmaktadır. Bazik oksijen fırını cürufunun agregada kullanılması sadece düşük frekanslarda ses yutma katsayısını arttırmakla kalmayıp orta frekans değerlerinde de ses yutma performansını arttırabilmektedir. Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu agregada bulunan karışımlar genel olarak 63 Hz ile 1200 Hz arasında daha yüksek düzeyde ses yutma performansı sergileyebilmektedirler. Sadece 1400 Hz ile 1600 Hz arasında agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılmaması ile ses yutma katsayısını arttırabilmektedir. Agregada karışımında maksimum cüruf oranına sahip olan karışım tipi, genel anlamda, 250 Hz ile 650 Hz arasında en yüksek düzeyde ses yutma performansına sahip olmaktadır.

**Şekil.6** 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri

Şekil 7'de, hacimsel olarak agregada içeriğindeki bazik oksijen fırını cürufu oranı doğrultusunda, 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların 3 boyutlu ses yutma grafiği verilmiştir. Agregada bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, maksimum düzeyde ses yutma performansının gözlendiği tepe noktalarını arttırmaktadır. Ayrıca, Şekil 6 ve Şekil 7'deki grafiklerinden, agregada karışımında bazik oksijen cürufunun kullanılmasının ses yutma performansını genel anlamda iyileştirebildiği anlaşılmaktadır. 6,35 cm'lik asfalt kaplama analizinde de agregada içeriğinin değiştirilmesi ile ses yutma performansını arttırılabildiği anlaşılmaktadır.



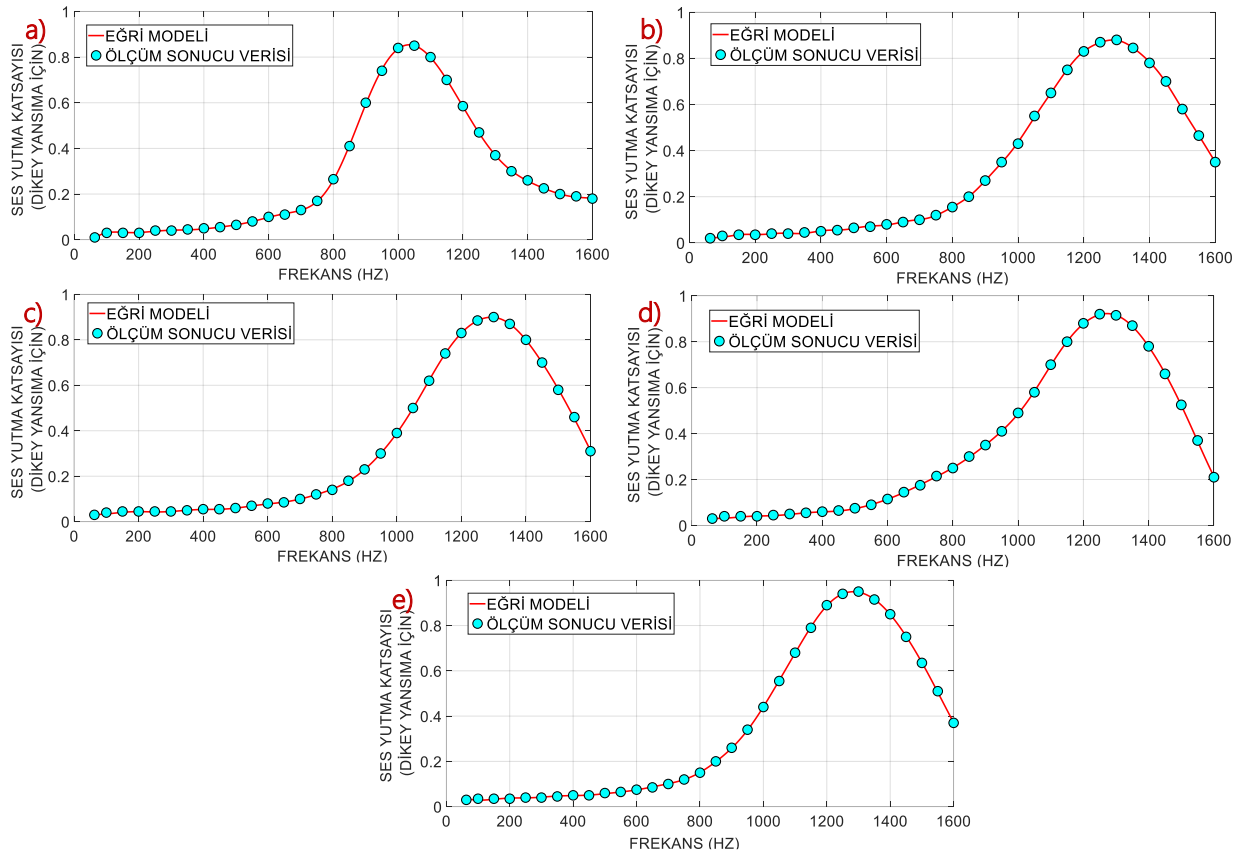
Şekil 7. 6,35 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların karışım oranına göre üç boyutlu ses yutma katsayısı grafiği

3.3. 3 Cm Kalınlığındaki Asfalt Kaplamaların Numerik Analizi (Numerical Analysis of 3 Cm Thickness Asphalt Pavements)

63 Hz ile 1600 Hz arasındaki 32 noktanın ses yutma katsayısı ölçüm sonucu göz önünde tutulmuş, maksimum 50 Hz aralıklarla ölçüm noktaları analiz edilmiş, MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi kullanılarak 32 ölçüm sonucuna göre model eğrileri türetilmiştir. 3 cm asfalt kaplamalarda, hacimsel olarak agrega içeriğinde bulunan bazik oksijen fırını cürufunun oranlarına göre türetilen model eğrileri Şekil 8 'de verilmektedir. 3 cm kalınlıktaki asfalt kaplamalar için MATLAB programında sin8 eğri uyarlama yöntemi doğrultusunda elde edilen model eğrilerinin formülleri Tablo 6'da sunulmaktadır. İlgili frekanslardaki ses yutma katsayısı, Tablo 6'da verilen formüller yardımı ile yaklaşık olarak öngörülebilecektir. Eğri modellerinin güvenilirlik oranının %95 olduğu MATLAB programında belirtilmiştir.

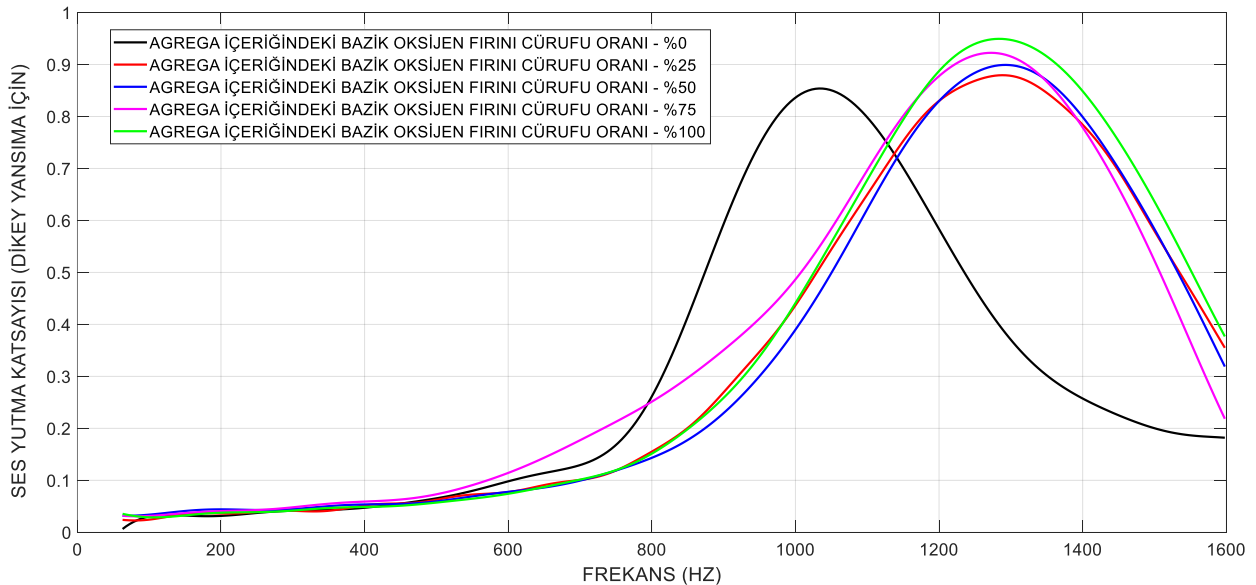
Tablo 6. 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega içeriğindeki bazik oksijen fırını cüruf oranına göre ses yutma katsayısının denklemleri (x: Frekans-Hz)

| Oran Yüzdesi | Fonksiyon Denklemi |
|--------------|---|
| %0 | $P(x) = 0,5228\sin(0,00201x-0,6681) + 0,2409\sin(0,007083x+0,3993) + 0,09017\sin(0,01258x+1,195) + 0,004692\sin(0,0006031x+0,1959) + 0,02015\sin(0,0189x+1,771) + 0,00531\sin(0,02302x-0,1675) - 0,00203\sin(0,03053x-2,633) - 0,004012\sin(0,0273x+4,049)$ |
| %25 | $P(x) = 0,5448\sin(0,002017x-0,4299) + 0,3705\sin(0,004139x+2,044) + 0,08529\sin(0,008176x-2,553) + 0,01638\sin(0,01226x-1,255) + 0,002267\sin(0,049x+0,3532) + 0,00364\sin(0,01634x-1,238) + 0,001993\sin(0,02043x-3,075) + 0,002398\sin(0,02453x-2,215)$ |
| %50 | $P(x) = 0,5618\sin(0,00218x-0,5717) + 0,3977\sin(0,004309x+1,788) + 0,09287\sin(0,008271x-2,914) + 0,02121\sin(0,01252x-1,621) + 0,003291\sin(0,01864x-1,83) + 0,001144\sin(0,0233x-2,032) + 0,001146\sin(0,02556x+4,641) + 0,001686\sin(0,03223x+2,151)$ |
| %75 | $P(x) = 0,5826\sin(0,002104x-0,4913) + 0,3607\sin(0,004477x+1,822) + 0,08427\sin(0,008434x-3,14) + 0,02738\sin(0,01259x-2,02) + 0,004071\sin(0,01989x+3,648) + 0,00295\sin(0,02336x-1,25) + 0,001124\sin(0,02879x+1,92) + 0,001706\sin(0,03215x+2,999)$ |
| %100 | $P(x) = 0,5863\sin(0,00206x-0,43) + 0,426\sin(0,004078x+2,07) + 0,09818\sin(0,008192x-2,637) + 0,02112\sin(0,01226x-1,372) + 0,00243\sin(0,02044x+2,595) + 0,001719\sin(0,02453x-2,968) + 0,001345\sin(0,02862x+2,91) + 0,001255\sin(0,03679x+1,412)$ |



Şekil 8. 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamada agrega olarak kullanılan bazik oksijen fırını cürufu hacimsel oranlarına göre elde edilen model eğrileri, a) %0, b) %25, c) %50, d) %75, e) %100

Şekil 9’da numerik model eğrilerinin tek bir grafikte gösterimi yapılmıştır. Şekil 9’da agrega içerisinde bazik oksijen fırını cürufunun kullanılmasıyla maksimum ses yutma performansının gözlemlendiği tepe noktaların yüksek frekanslara doğru kaydığı anlaşılmaktadır. Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması, 63 Hz ile 800 Hz aralığındaki frekansların ses yutma performansını iyileştirebilmektedir. Ayrıca agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu kullanıldığı takdirde 1100 Hz ile 1600 Hz aralığındaki ses yutma katsayısı artmaktadır. Yaklaşık olarak 800 Hz ile 1100 Hz aralığında bazik oksijen fırını cürufunun agrega karışımında kullanılması ses yutma katsayısını azaltmıştır.



Şekil 9. 3 cm kalınlığındaki asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı numerik model eğrileri

3.4. Değişen Asfalt Kaplama Kalınlıklarına Göre Analizler (Analysis According to Changing Asphalt Pavement Thicknesses)

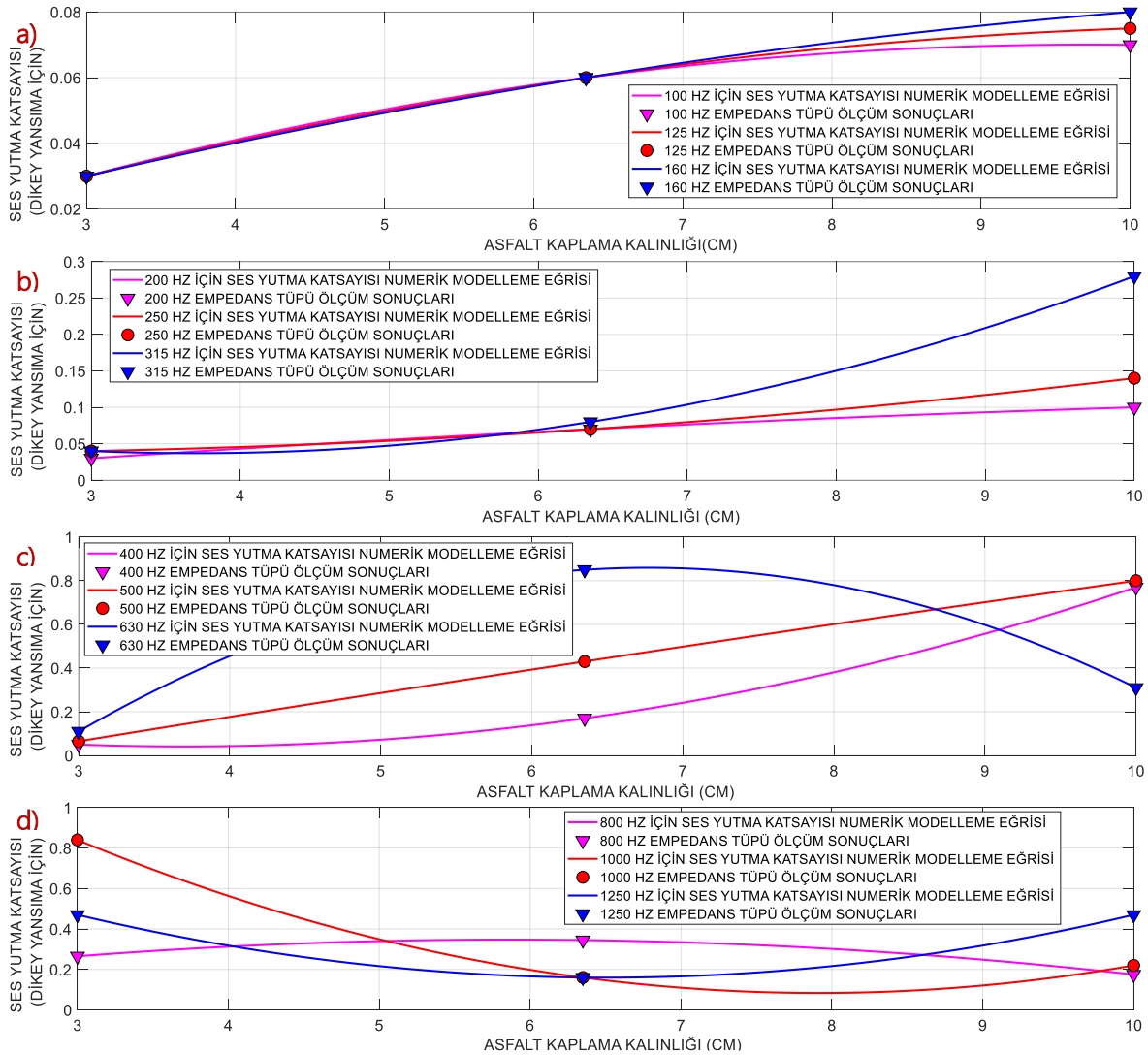
Asfalt kaplamalarda düşük frekanslardaki ses yutma performansının artırılması yapı maliyetlerini azaltabilmektedir. Bina ölçeğindeki ses yalıtım problemlerine çözüm sunulması gerekir ve düşük frekanslardaki ses yalıtımının sağlanabilmesi için ağır ve kalın bina kesitlerine ihtiyaç duyulabilmektedir. Literatürdeki sunulmuş olan mimari akustik konusundaki çalışmalarda, düşük frekansların ses yalıtım performansının artırılması için ağır ve kalın bina kesitlerine ihtiyaç duyulabildiği açıklanmaktadır [44-48]. Bu kapsamda, düşük frekanslardaki ses yalıtımının sağlanması bina yükünü ve maliyetini arttırabilmektedir. Eğer kent ölçeğinde düşük frekansların gürültü düzeyi azaltılabilirse bina kesiti detaylarında daha ekonomik çözümler sunulabilecektir. ISO 717-2 standardında [49] trafik gürültüsünün gürültü spektrumu tanımlanmış ve düşük frekansların trafik gürültüsünde etkin olduğu belirtilmiştir [17]. Tüm bu sebeplerden dolayı, asfalt kaplamalarda düşük frekanslardaki ses yutma performansının artırılması çok büyük öneme sahiptir. Bu sebeple, bu çalışmada kalınlık değişiminin 1/3 oktav bant frekanslarındaki ses yutma performansı incelenmiştir.

Asfalt kaplamalarda değişen kalınlık değerlerine göre numerik modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı karışım içeriğine sahip asfalt kaplamaların değişen asfalt kaplama kalınlıklarına göre MATLAB programında eğri uyarlama metoduyla numerik model eğrileri üretilmiştir. Bu sayede, ses yutma katsayısı ölçümü gerçekleştirilmeyen ara kalınlık değerlerindeki ses yutma katsayısı değerleri numerik model eğrileri sayesinde yaklaşık olarak hesaplanabilecektir. MATLAB programında eğri uyarlama yöntemi kullanılarak numerik model eğrileri 100 Hz ile 1250 Hz aralığında bulunan 1/3 oktav bant frekanslar için üretilmiştir. Agregata karışımındaki bazik oksijen fırını cürufunu oranının %0 ve %100 olmasına göre analizler yürütülmüştür. Shen ve arkadaşlarının [20] çalışmasından alınan empedans tüpü 1/3 oktav bant ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları Tablo 7’de sunulmaktadır. Tablo 7’te verilen ölçüm sonuçlarına göre numerik model eğrileri değişen asfalt kaplama kalınlıklarına göre üretilmiştir. Modelleme sürecinde 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm asfalt kalınlıkları göz önünde tutulmuş ve üç ölçüm noktasına göre nümerik eğri modelleri üretilmiştir. MATLAB programında eğri uyarlama metodundaki Poly2 eğri uyarlama modeli kullanılmıştır. Üretilen model eğrileri yardımıyla analizi yapılan asfalt kaplamaların ses yutma performansı değişen asfalt kalınlıklarına göre öngörülebilir (3 ile 10 cm kalınlık aralığında). Üretilen eğri modellerine ait formüller Tablo 8’de sunulmuştur. Poly2 eğri uyarlama modeli ile üretilen eğrilerin eğri uyarlama kalitesi MATLAB programında fit komutunun çıktılarında olan gof (Goodness of Fit) değişkeni ile kontrol edilmiştir. Fit komutunun çıktılarında olan gof değişkeni komutu ile değişen asfalt kalınlıklarına göre üretilen model eğrilerin R-kare (R-square) değeri 1 olarak elde edilmiştir. Şekil 10, Şekil 11 ve Tablo 8’de verilen model eğrilerinin R-kare değeri 1’e eşit olmaktadır. Model eğrilerinin ölçüm noktası sonuçlarına göre çok uyumlu bir şekilde üretildiği belirlenmiştir.

Tablo 7. Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranına ve değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları (dikey yansıma için) [20]

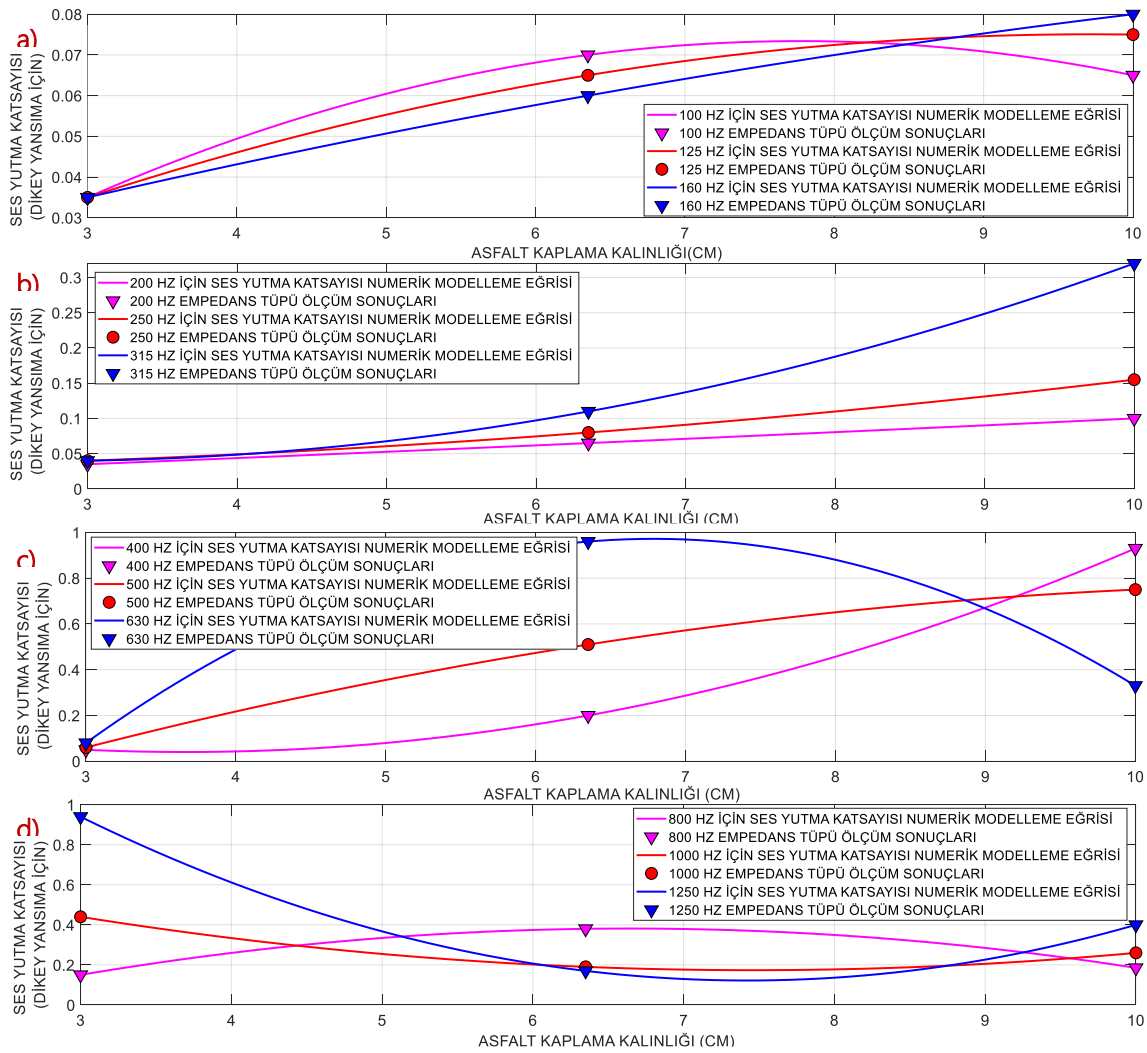
| Frekans (Hz) | Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %0 oranında olması | | | Agregata karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %100 oranında olması | | |
|--------------|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|
| | 3 cm | 6,35 cm | 10 cm | 3 cm | 6,5 cm | 10 cm |
| | Kalınlığında Numune | Kalınlığında Numune | Kalınlığında Numune | Kalınlığında Numune | Kalınlığında Numune | Kalınlığında Numune |
| 100 Hz | 0,03 | 0,06 | 0,07 | 0,035 | 0,07 | 0,065 |
| 125Hz | 0,03 | 0,06 | 0,075 | 0,035 | 0,065 | 0,075 |
| 160Hz | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,035 | 0,06 | 0,08 |
| 200 Hz | 0,03 | 0,07 | 0,1 | 0,035 | 0,065 | 0,1 |
| 250 Hz | 0,04 | 0,07 | 0,14 | 0,04 | 0,08 | 0,155 |
| 315 Hz | 0,04 | 0,08 | 0,28 | 0,04 | 0,11 | 0,32 |
| 400 Hz | 0,05 | 0,17 | 0,77 | 0,05 | 0,2 | 0,93 |
| 500 Hz | 0,065 | 0,43 | 0,8 | 0,06 | 0,51 | 0,75 |
| 630 Hz | 0,11 | 0,85 | 0,31 | 0,08 | 0,96 | 0,33 |
| 800 Hz | 0,265 | 0,345 | 0,175 | 0,15 | 0,38 | 0,185 |
| 1000 Hz | 0,84 | 0,16 | 0,22 | 0,44 | 0,19 | 0,26 |
| 1250 Hz | 0,47 | 0,16 | 0,47 | 0,94 | 0,17 | 0,4 |

Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufunun %0 oranında olması durumuna göre türetilen ve 1/3 oktav bant frekanslarına göre hazırlanan model eğrileri Şekil 10'da sunulmaktadır. Tablo 8'de, BOF cürufu oranı %0 olan karışım için 1/3 oktav bant frekanslarında türetilen model eğrilerinin denklemleri verilmiştir. Şekil 10'da ve Tablo 8'de asfalt kalınlıkları 3 ile 10 cm arasında değişmektedir ve model eğrileri bu aralık değerine göre analiz edilmektedir. 100 Hz ile 1250 Hz arasındaki 1/3 oktav bant frekansları için hazırlanmış olan model eğrileri, aynı karışım tipinde 3 cm ile 10 cm arasındaki ölçümü gerçekleştirilmeyen ara kalınlık değerlerinin ses yutma katsayısı hakkında bilgi sunmaktadır. Şekil 10a'da 100 Hz, 125 Hz ve 160 Hz numerik model eğrileri sunulmuştur ve bu frekans değerlerinde asfalt kaplama kalınlığı arttıkça ses yutma katsayısı artmaktadır. Şekil 10b'de 200 Hz, 250 Hz ve 300 Hz numerik model eğrileri sunulmuş ve asfalt kalınlığı arttıkça ses yutma katsayısı da artış göstermiştir. 315 Hz değerine ses yutma katsayısı kalınlığa bağlı olarak dikkate değer düzeyde artmaya başladığı anlaşılmaktadır. Şekil 10c'de 400 Hz, 500 Hz ve 630 Hz model eğrileri verilmiştir. 500 Hz ve 400 Hz değerlerindeki numerik model eğrilerinde, kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma katsayısı çok yüksek düzeyde artmıştır ve en yüksek düzeyde ses yutma performansı artışı gözlemlenmiştir. Şekil 10d'de 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz modelleme eğrileri verilmiştir. 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz frekanslarındaki modelleme eğrilerinde kalınlık artışına bağlı olarak dalgalanmalar gözlemlenmektedir ve ses yutma katsayısı asfalt kaplama kalınlık artışına bağlı olarak azalabildiği anlaşılmaktadır. Özet olarak 100 Hz ile 500 Hz arasındaki 1/3 oktav bant numerik model eğrilerinde asfalt kaplamanın kalınlık artışında ses yutma katsayısının arttığı gözlemlenmektedir. Asfalt kaplamanın kalınlık artışı düşük frekanslardaki ses yutma katsayısını arttırabilmektedir.



Şekil 10. Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %0 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrileri, a) 100 Hz ile 160 Hz arası, b) 200 Hz ile 315 Hz arası, c) 400 Hz ile 630 Hz arası, d) 800 Hz ile 1250 Hz arası

Agrega karışımındaki bazik oksijen fırını cürufu oranının %100 olduğu asfalt kaplamalara ait, eğri uyarlama metodu ile üretilen 1/3 oktav bant frekanslarındaki modelleme eğrileri Şekil 11'de verilmektedir ve 1/3 oktav bant frekanslarında üretilen eğri modellerinin denklemleri Tablo 8'de sunulmuştur. Şekil 11'de verilen numerik model eğrileri yardımı ile veya Tablo 8'de verilen numerik model eğrilerinin denklemleri ile (3 cm ile 10 cm kalınlık aralığında olan) aynı karışım içeriğine sahip asfalt kaplamaların ses yutma katsayısı değeri katman kalınlığına göre öngörülebilir. Ölçümü gerçekleştirilmeyen ara katman kalınlıklarındaki değerler eğri modelleri sayesinde yaklaşık olarak belirlenebilir. Şekil 11a'da 100 Hz, 125 Hz ve 160 Hz 1/3 oktav bant frekanslarındaki ses yutma katsayısı eğri modelleri verilmiş ve kalınlık artışının düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabildiği gösterilmiştir. Şekil 11b'da 200 Hz, 250 Hz ve 315 Hz model eğrileri verilmiş ve kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma performansı artmış, frekans arttıkça kalınlığa bağlı ses yutma performansı artışı da artmıştır. Şekil 11c'de 400 Hz, 500 Hz ve 630 Hz frekanslarındaki eğri modelleri gösterilmiş ve kalınlık artışına bağlı olarak 400 Hz ve 500 Hz frekans değerlerindeki ses yutma performansı en fazla artış karakteri sergilemiştir. Asfalt kalınlık artışı, 400 Hz ve 500 Hz frekanslarının ses yutma performansını çok yüksek düzeyde arttırabilmiştir. Şekil 11d'de 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz numerik model eğrileri verilmiştir. 500 Hz değerinden sonraki 1/3 oktav bant frekanslarındaki (630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz ve 1250 Hz) numerik model eğrilerinde dalgalanmalar gözlemlenmekte ve kalınlık artışına bağlı olarak ses yutma katsayısı azalabilmektedir. Düşük frekanslardan 500 Hz değerine kadar asfalt kaplama kalınlığının artması ses yutma performansını arttırmıştır. Düşük frekansların ses yutma performansını arttırabilmek için asfalt kaplama kalınlığının arttırılması faydalı olabilmektedir.



Şekil 11. Agregada karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %100 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrileri, a) 100 Hz ile 160 Hz arası, b) 200 Hz ile 315 Hz arası, c) 400 Hz ile 630 Hz arası, d) 800 Hz ile 1250 Hz arası

Tablo 8. *Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının %0 ve %100 olduğu asfalt kaplamalarda değişen asfalt kalınlıklarına göre 1/3 oktav bant modelleme eğrilerinin formülleri (x = asfalt kaplama kalınlığı, 3 ile 10 cm arası)*

| Frekans (Hz) | Fonksiyon Denklemleri | |
|-----------------|---|---|
| | %0 BOF Cüruf Karışımı | %100 BOF Cüruf Karışımı |
| 100 Hz | $P(x) = -0,0008879x^2 + 0,01726x - 0,01378$ | $P(x) = -0,001688x^2 + 0,02623x - 0,0285$ |
| 125 Hz | $P(x) = -0,0006922x^2 + 0,01543x - 0,01005$ | $P(x) = -0,0008879x^2 + 0,01726x - 0,008781$ |
| 160 Hz | $P(x) = -0,0004965x^2 + 0,0136x - 0,006325$ | $P(x) = -0,0002833x^2 + 0,01011x + 0,007215$ |
| 200 Hz | $P(x) = -0,0005316x^2 + 0,01691x - 0,01595$ | $P(x) = 0,00009055x^2 + 0,008109x + 0,009859$ |
| 250 Hz | $P(x) = 0,00146x^2 - 0,0047x + 0,04096$ | $P(x) = 0,00123x^2 + 0,0004429x + 0,0276$ |
| 315 Hz | $P(x) = 0,006122x^2 - 0,0453x + 0,1208$ | $P(x) = 0,005234x^2 - 0,02804x + 0,07702$ |
| 400 Hz | $P(x) = 0,01837x^2 - 0,1359x + 0,2924$ | $P(x) = 0,02217x^2 - 0,1626x + 0,3381$ |
| 500 Hz | $P(x) = -0,001084x^2 + 0,1191x - 0,2825$ | $P(x) = -0,009796x^2 + 0,2259x - 0,5296$ |
| 630 Hz | $P(x) = -0,05269x^2 + 0,7136x - 1,556$ | $P(x) = -0,06218x^2 + 0,8441x - 1,893$ |
| 800 Hz | $P(x) = -0,01007x^2 + 0,118x + 0,001617$ | $P(x) = -0,01744x^2 + 0,2317x - 0,3882$ |
| 1000 Hz | $P(x) = 0,03135x^2 - 0,4961x + 2,046$ | $P(x) = 0,0134x^2 - 0,1999x + 0,9192$ |
| 1250 Hz | $P(x) = 0,02535x^2 - 0,3296x + 1,231$ | $P(x) = 0,04184x^2 - 0,621x + 2,427$ |

Agrega karışımında %0 oranında bazik oksijen cürufunun kullanılması ile agrega karışımında %100 oranında bazik oksijen fırını cürufunun kullanılması durumlarında kalınlık değişimine bağlı olarak ses yutma katsayısı değişimi benzer özellikler sergileyebilmektedir. Her iki karışım tipi analizinde de 100 Hz' den 500 Hz değerine kadar olan 1/3 oktav bantlardaki ses yutma performansı kalınlık artışına bağlı olarak artmaktadır. Düşük frekanslardaki ses yutma performansının iyileştirilmesi için asfalt katman kalınlığının artırılması gerekebilmektedir.

Agrega olarak bazik oksijen fırını cürufunun gözenekli asfalt kaplamada agrega olarak kullanılması modellenmiştir ancak bazik oksijen fırını cürufunun su ve havadaki nem ile temasa geçerek korozyona uğraması göz önünde tutulmamıştır. Bu etkinin net olarak belirlenebilmesi için uzun zamana yayılan bir araştırma yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada korozyon etkisi ihmal edilerek modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Araştırma kapsamında gözenekli asfalt kaplamalar için gerçekleştirilen ses yutma katsayısı ölçüm sonuçları MATLAB programında modellenmiş ve analiz edilmiştir. Asfalt kaplamaların agrega karışımındaki bazik oksijen fırını cürufu oranına göre eğri modelleri MATLAB programında türetilmiştir. Elde edilen eğri modelleri üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranı sırasıyla %0, %25, %50, %75 ve %100 olan beş farklı gözenekli asfalt kaplama için numerik eğri modelleri hazırlanmış, farklı gözenekli asfalt karışım tipleri kendi arasında karşılaştırılmıştır. 3 cm, 6,35 cm ve 10 cm kalınlığında asfalt kaplamalar, karışım içeriğine göre ayrı ayrı analiz edilmiş ve toplam 15 farklı ses yutma katsayısı eğrisi numerik olarak elde edilmiştir. Ayrıca, aynı karışım içeriğine sahip farklı kalınlıklardaki asfalt numunelerin ses yutma katsayısı 1/3 oktav bant frekanslarında eğri uyarılama yöntemi ile modellenmiştir. Elde edilen eğri modelleri kullanılarak asfalt kaplama kalınlığı değişimine göre ses yutma katsayısı tahminleri yaklaşık olarak yapılabilecektir. Gözenekli asfalt kaplamalarda ses yutma performansının artırılması ile ilgili araştırma sonuçları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- Asfalt kaplamalarda, kalınlık artışı ses yutma katsayısını arttırılabilmektedir.
- Gözenekli asfalt kaplamaların karışım içeriği değiştirilerek belirli frekans değerlerinde ses yutma performansı iyileştirilebilmektedir.
- Agrega karışımında bazik oksijen fırını cürufu oranının artması düşük frekanslardaki ve yüksek frekanslardaki ses yutma performansını arttırılabilmektedir.

- Gözenekli asfalt kaplamaların karışım içeriğinde bazik oksijen firını cürufu oranının artması maksimum ses yutma performansının gözlemlendiği tepe noktalarının artmasına sebep olabilmektedir.
- Gözenekli asfalt kaplamanın kalınlığı arttığında, (3cm ile 10 cm asfalt kaplama kalınlığı aralığında) 100 Hz ile 500 Hz frekans aralığındaki ses yutma katsayısının arttığı tespit edilmiştir.
- Gözenekli asfalt kaplamalarda, asfalt kalınlığının artırılması özellikle düşük frekanslardaki ses yutma performansını arttırabilmektedir.

Asfalt kaplamalardaki karışım içeriğinin değiştirilmesi ile ses yutma performansının artırılması çok geniş bir araştırma konusu olmaktadır. Bununla birlikte, gözenekli asfalt kaplamaların mekanik açıdan tasarımı ve gözenekli asfalt kaplamalarda yol güvenliğinin sağlanmasının araştırılması gereken önemli konular arasındadır. Özellikle gözenekli asfaltın yağmur sularını hızlı drenajını sağlaması sürüş konforuna katkı sunabilecektir. Ayrıca, yağmur sularının zararlı etkileri azaltılarak asfalt kaplamanın servis ömrü arttırılabilecektir. Bunun yanında, gözenekli asfalt kaplamalarda kullanılan agregalarda, korozyon etkisinin de incelenmesi asfalt kaplamanın dayanımı ile ilgili yeni verilerin elde edilmesine katkı sunacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The field study and numerical simulation of industrial noise mapping, Journal of Building Engineering, Volume 9, January 2017, Pages 60-75, <https://doi.org/10.1016/j.job.2016.11.007>
- [2] World Health Organization, (2018), Environmental Noise Guidelines for the European Region, ISBN 978 92 890 5356 3
- [3] Chen, D., Ling C., Wang T., Su, Q., Ye, A., Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions, Construction and Building Materials 173 (2018) 801–810, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062>
- [4] Kleizienė R., Šernas O., Vaitkus A., Simanavičienė R., Asphalt Pavement Acoustic Performance Model. Sustainability. 2019; 11(10):2938. <https://doi.org/10.3390/su11102938>
- [5] Gilani, T.A., Mir, M.S. A study on the assessment of traffic noise induced annoyance and awareness levels about the potential health effects among residents living around a noise-sensitive area. Environ Sci Pollut Res 28, 63045–63064 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15208-3>
- [6] ISO 9613–2:1996, Acoustics, Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 2: General method of calculation
- [7] Bozkurt, T.S., Preparation of Industrial Noise Mapping and Improvement of Environmental Quality, Current Pollution Reports (2021), Volume 7, Pages: 325 - 343, <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00195-3>
- [8] Kotzen, B., English, C., (2009), Environmental Noise Barriers, Second edition, Taylor & Francis Group, ISBN 0-203-93138-6 Master e-book ISBN, ISBN10: 0–203–93138–6 (ebook), ISBN13: 978–0–203–93138–7 (ebook)
- [9] Barros, A.G.D., Kampen, J.K., Vuye, C., The Impact of Thin Asphalt Layers as a Road Traffic Noise Intervention in an Urban Environment, Sustainability 2021, 13, 12561. <https://doi.org/10.3390/su132212561>
- [10] Chen, D., Ling C., Wang T., Su, Q., Ye, A., Prediction of tire-pavement noise of porous asphalt mixture based on mixture surface texture level and distributions, Construction and Building Materials 173 (2018) 801–810, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.062>

- [11] Chu L., Fwa T.F., Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 436–443, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.162>
- [12] Wang, H., Ding, Y., Liao, G., Ai, C., Modeling and Optimization of Acoustic Absorption for Porous Asphalt Concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Volume 142, Issue 4, April 2016, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001037)
- [13] Liu, M., Huang, X., Xue, G., Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction, *International Journal of Sustainable Built Environment* (2016) 5, 183–196, <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.02.001>
- [14] Zhang, H., Liu, Z., Meng, X., Noise reduction characteristics of asphalt pavement based on indoor simulation tests, *Construction and Building Materials* 215 (2019) 285–297, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.220>
- [15] Kalauni, K., Pawar, S.J., A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials. *J Porous Mater* 26, 1795–1819 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10934-019-00774-2>
- [16] Gao, L., Wang, Z., Xie, J., Wang, Z., Li, H., Study on the sound absorption coefficient model for porous asphalt pavements based on a CT scanning technique, *Construction and Building Materials* 230 (2020) 117019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117019>
- [17] Mikhailenko, P., Piao, Z., Kakar, M.R., Athari, S., Bueno, M., Poulikakos, L.D., Effect of waste PET and CR as sand replacement on the durability and acoustical properties of semi dense asphalt (SDA) mixtures, *Sustainable Materials and Technologies* 29 (2021) e00295, <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00295>
- [18] Alber, S., Ressel, W., Liu, P., Hu, J., Wang, D., Oeser, M., Uribe, D., Steeb, H., Investigation of microstructure characteristics of porous asphalt with relevance to acoustic pavement performance, *International Journal of Transportation Science and Technology* 7 (2018) 199–207, <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.06.001>
- [19] Chu L., Fwa T.F., Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements, *Construction and Building Materials* 197 (2019) 436–443, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.162>
- [20] Shen, D.-H., Wu, C.-M., Du, J.-C., Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials* 23(1), 453–461 (2009), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001>
- [21] ISO 354:2003, Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room
- [22] ISO 10534-2, Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method
- [23] Everest, F. A., Pohlmann, K. C., (2009), *Master Handbook of Acoustic*, Fifth Edition, McGraw-Hill, ISBN: 978-0-07-160333-1
- [24] ASTM E1050, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System
- [25] Li, M., Keulen, W.N., Tijss, E., Ven, M.V.D., Molenaar, A., Sound absorption measurement of road surface with in situ technology, *Applied Acoustics* 88 (2015) 12–2, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.07.009>

- [26] Vaitkus, A., Čygas, D., Vorobjovas, V., Andriejauskas, T., Traffic/Road Noise Mitigation under Modified Asphalt Pavements, *Transportation Research Procedia* 14 (2016) 2698 – 2703, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.446>
- [27] Vaitkus A., Andriejauskas T., Vorobjovas V., Jagniatinskas A., Fiks, B., Zofka, E., Asphalt wearing course optimization for road traffic noise reduction, *Construction and Building Materials*, Volume 152, 15 October 2017, Pages 345-356, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.130>
- [28] Ding Y., Wang H., FEM-BEM analysis of tyre-pavement noise on porous asphalt surfaces with different textures, *International Journal of Pavement Engineering*, 2019, VOL. 20, NO. 9, 1090–1097, <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1388507>
- [29] Gardziejczyk, W., Jaskula, P., Ejsmont, J.A., Motylewicz, M., Stienss, M., Mioduszewski, P., Gierasimiuk, P., Zawadzki, M., Investigation of Acoustic Properties of Poroelastic Asphalt Mixtures in Laboratory and Field Conditions, *Materials* 2021, 14, 2649, <https://doi.org/10.3390/ma14102649>
- [30] Kolodziej, V.M., Triches, J.S. Ledezma, G.C., Carlesso, L.M., Jardin, L.M., Knabben, R.M., Functional and durability properties evaluation of open graded asphalt mixes, *Transport Infrastructure and Systems*, 2017, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03009-1
- [31] Morcillo, M.A., Hidalgo, M.E., Pastrana, M.d.C., García, D., Torres, J., Arroyo, M.B., LIFE SOUNDLESS: New Generation of Eco-Friendly Asphalt with Recycled Materials. *Environments* 2019, 6, 48. <https://doi.org/10.3390/environments6040048>
- [32] Mavridou, S., Kehagia, F., Environmental Noise Performance of Rubberized Asphalt Mixtures: Lamia's case study, *Procedia Environmental Sciences* 38 (2017) 804 – 811, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.165>
- [33] Vázquez, V.F., Terán, F., Huertas, P., Paje, S.E., Asphalt Pavement With High Content Of Crumb Rubber. Acoustic Assessment, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, 4th International Conference, September 2017, ISSN 2183-0568
- [34] Wang, W., Cheng, Y., Chen, H., Tan, G., Lv, Z., Bai, Y., Study on the Performances of Waste Crumb Rubber Modified Asphalt Mixture with Eco-Friendly Diatomite and Basalt Fiber. *Sustainability* 2019, 11, 5282. <https://doi.org/10.3390/su11195282>
- [35] Chu L., Fwa, T. F., Tan, K.H., Evaluation of wearing course mix designs on sound absorption improvement of porous asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, Volume 141, 15 June 2017, Pages 402-409, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.027>
- [36] Wang, Z., Xie, J., Gao, L., Liu, M., Liu, Y., Improvement of acoustic model and structural optimization design of porous asphalt concrete based on meso-structure research, Volume 265, 30 December 2020, 120327, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120327>
- [37] Peng, B., Han, S., Han X., (2021): Laboratory and field evaluation of noise characteristics of porous asphalt pavement, *International Journal of Pavement Engineering*, <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1893319>
- [38] Zhao, C., Wang, P., Wang, L., Liu, D.: Reducing railway noise with porous sound-absorbing concrete slabs. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014, 11 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/206549>
- [39] Oancea, I., Bujoreanu, C., Budescu, M., Benchea, M., Grădinaru, M., C., Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements, *Journal of Cleaner Production*, Volume 203, 1 December 2018, Pages 301-312, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>

- [40] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., Laboratory analyses and numerical simulation for sound absorption of plasters in historical buildings, *Journal of Cultural Heritage*, Volume 36, March–April 2019, Pages 103-117, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.012>
- [41] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The laboratory analyses for the plasters prepared with river sand aggregate and hydraulic lime binder, *Construction and Building Materials*. 190, 691–709 (2018), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.073>
- [42] Bozkurt, T.S., Demirkale S.Y., Investigation and development of sound absorption of plasters prepared with pumice aggregate and natural hydraulic lime binder, *Applied Acoustics*, Volume 170, 15 December 2020, 107521, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107521>
- [43] Bozkurt, T.S., Demirkale, S.Y., The experimental research of sound absorption in plasters produced with perlite aggregate and natural hydraulic lime binder. *Acoust Aust* 48, 375–393 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40857-020-00203-4>
- [44] Ginn K. B., (1978), *ARCHITECTURAL ACOUSTICS*, Brüel & Kjaer, ikinci Baskı, ISBN: 87 87355 24 8
- [45] Mehta, M., Johnson, J. and Rocaford J., (1999), *Architectural Acoustics Principles and Design*, Prentice Hall, ISBN: 0-13-793795-4
- [46] Barron, R. F., (2003), *Industrial Noise Control and Acoustics*, Marcel Dekker Inc., Newyork, Basel. ISBN:0-8247-0701-X
- [47] Beranek, L. L., Ver, I. L., (2006), *Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications*, John Wiley&Sons, Inc., ISBN-13: 978-0471-44942-3 ve ISBN-10: 0471-44942-3
- [48] Jaramillo, A. M., Stell, C., (2015), *Architectural Acoustics*, Taylor & Francis Group, ISBN: 978-1-315-75284-6 (ebk)
- [49] ISO 717-1:2013, *Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne sound insulation*



2-Tuple Full Linguistic Intuitionistic Fuzzy Set Approach: An Application on Decision Making

Gürkan IŞIK^{1,*}

¹Bursa Technical University, Department of Industrial Engineering, 16310, Bursa/TÜRKİYE

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 4.04.2022
Revision: 22.05.2022
Accepted: 24.05.2022

Highlights

- Fuzzy Modeling,
- Linguistic Terms.
- 2-Tuple LFM.

Keywords

Decision making,
Fuzzy set,
Intuitionistic fuzzy
set, 2-tuple linguistic
fuzzy modeling,
2-tuple linguistic
intuitionistic fuzzy
modeling

Linguistic fuzzy modeling (LFM) is an approach that enables to express the uncertainties related to real life problems with the help of words and symbols. The 2-tuple LFM approach has been proposed in the literature to deal with the loss of information caused by the dependency of the position of the kernel and support points of fuzzy sets (FS) to linguistic terms (LT), in which a linguistic expression consists of a linguistic term and a numerical value called difference of information (DOI). 2-tuple LFM is useful for increasing accuracy, but it partially damages the "computing with words" concept and reduces interpretability, because of being a hybrid numerical-linguistic approach.

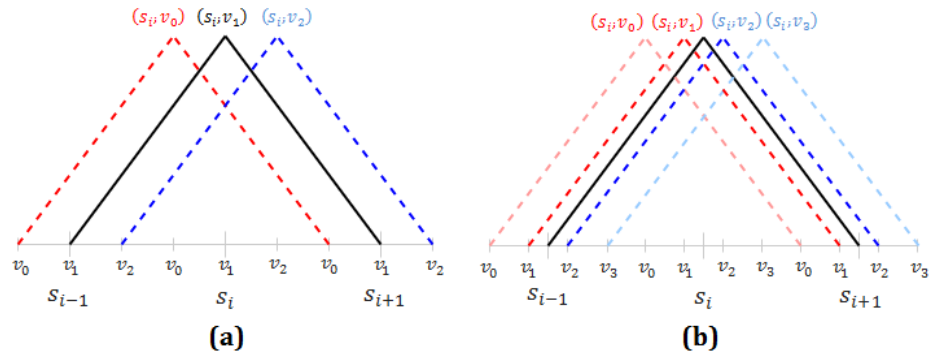


Figure A. 2-tuple full linguistic statements having secondary term set having (a) 3 and (b) 4 elements

Purpose: In this study, 2-tuple Full LFM (FLFM) approach having verbal BF, which is more inclusive version of ordinary 2-tuple LFM, has been proposed. To obtain a more useful modeling approach in real life problems, the proposed approach is extended for intuitionistic FSs (IFS) and 2-Tuple Full Linguistic Intuitionistic Fuzzy Modeling (FLIFM) has been proposed.

Theory and Methods: The proposed approach has been applied to a decision-making problem in the energy sector to test its ability to model real-life behaviors. By using a relatively small set of linguistic terms, sensitive and literature-compliant results that are suitable for sensitivity analysis were obtained.

Results: By using a relatively small set of linguistic terms, sensitive and literature-compliant results that are suitable for sensitivity analysis were obtained.

Conclusion: The proposed approach can be used for modeling different types of problems as it also covers the missing information situation encountered in real life problems. As future work, the proposed approach can be integrated with the context-free grammar approach. The proposed approach can be extended for Pythagorean fuzzy sets to cover the case of inconsistent data.



2-Tuple Full Linguistic Intuitionistic Fuzzy Set Approach: An Application on Decision Making

Gürkan IŞIK^{1,*}

¹Bursa Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa/TÜRKİYE

Abstract

Linguistic fuzzy modeling (LFM) is an approach that enables to express the uncertainties related to real life problems with the help of words and symbols. Since the uncertainties can be expressed more understandably with LFM, it is often useful for modeling processes involving humans. A significant issue about LFM is the dependency of the position of the kernel and support points of fuzzy sets (FS) to linguistic terms (LT). This dependency causes loss of information and reduces the accuracy of modeling. 2-tuple LFM approach has been proposed in the literature to deal with this issue, in which a linguistic expression consists of a linguistic term and a numerical value called difference of information (DOI). 2-tuple LFM is useful for increasing accuracy, but it partially damages the "computing with words" concept and reduces interpretability, because of being a hybrid numerical-linguistic approach. In this study, 2-tuple Full LFM (FLFM) approach having verbal BF, which is more inclusive version of ordinary 2-tuple LFM, has been proposed. To obtain a more useful modeling approach in real life problems, the proposed approach is extended for intuitionistic FSs (IFS) and 2-Tuple Full Linguistic Intuitionistic Fuzzy Modeling (FLIFM) has been proposed. The proposed approach has been applied to a decision-making problem in the energy sector to test its ability to model real-life behaviors. By using a relatively small set of linguistic terms, sensitive and literature-compliant results that are suitable for sensitivity analysis were obtained.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 04.04.2022
Düzeltilme: 22.05.2022
Kabul: 24.05.2022

Keywords

Decision making,
Fuzzy set,
Intuitionistic fuzzy set,
2-tuple linguistic fuzzy
modeling,
2-tuple linguistic
intuitionistic fuzzy
modeling

Anahtar Kelimeler

Bulanık küme,
Karar verme,
Sezgisel bulanık küme,
2-öğeli dilsel bulanık
modelleme,
2-öğeli dilsel sezgisel
bulanık modelleme

2-Öğeli Tam Dilsel Sezgisel Bulanık Küme Yaklaşımı: Karar Verme Üzerine Bir Uygulama

Öz

Dilsel bulanık modelleme (DBM), gerçek hayat problemlerine ilişkin belirsizliklerin kelimeler ve semboller yardımıyla ifade edilmesini sağlayan bir yaklaşımdır. DBM sayesinde belirsizlikler daha anlaşılır bir şekilde ifade edilebildiği için genellikle insanların dâhil olduğu süreçlerin modellemesi için kullanışlıdır. DBM ile ilgili önemli bir zayıflık, dilsel terimlere karşılık gelen bulanık kümelerin (BK) çekirdek ve destek noktalarının dilsel terimlerle (DT) olan doğrudan bağımlılığıdır. Bu bağımlılık, hassas modellemeyi kısıtladığı için bilgi kaybına neden olur. Bu sorunun üstesinden gelmek için literatürde, bir dilsel ifadeye bilgi farkı (BF) adlı sayısal bir değer eşlik ettiği 2-öğeli DBM yaklaşımı önerilmiştir. 2-öğeli DBM tutarlılığı artırmada faydalı olsa da melez bir sayısal-dilsel yaklaşım olması nedeniyle "kelimelerle hesaplama" yaklaşımına zarar verir ve yorumlanabilirliği azaltır. Bu çalışmada, 2-öğeli DBM'nin daha kapsayıcı bir sürümü olan dilsel BF'ye sahip 2-Öğeli Tam DBM yaklaşımı önerilmiştir. Gerçek hayat problemlerinde daha kullanışlı bir modelleme yaklaşımı elde edebilmek amacıyla, önerilen yaklaşım sezgisel bulanık kümeler için genişletilmiş ve 2-öğeli tam dilsel sezgisel bulanık modelleme (DSBM) önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, gerçek hayat davranışlarını modelleyebilme yeteneğini test etmek amacıyla enerji sektöründe bir karar verme problemi üzerinde uygulanmıştır. Görece küçük bir dilsel terim kümesi kullanılarak, duyarlılık analizi yapmaya elverişli, hassas ve literatür ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik yöntemlerinin çoğu, elverişli sonuçlara ulaşmak için kesin bilgilere ihtiyaç duyar. Bu durum, gerçek hayat problemlerini temsil etmek açısından önemli bir zayıflık doğurur. Zadeh [1], gerçek hayattaki

belirsizlikleri modellemek için bulanık küme (BK) yaklaşımını önermiştir. Geleneksel BK'ler sayısal değerler kullanır fakat insanlar kelimelerle düşünür. Zadeh [2] tarafından önerilen dilsel bulanık modelleme (DBM), kelimelerle düşünmek ve bunları dilsel kestirim yardımıyla BK'lere dönüştürmeye olanak veren kullanışlı bir yaklaşımdır.

Bulanık modellemenin kalitesi yorumlanabilirlik ve doğruluk özellikleri ile ölçülür. Yorumlanabilirlik, modelin sistem davranışını anlaşılır bir şekilde ifade etme yeteneğini gösterirken doğruluk, gerçek sisteme yakınlığı temsil etmektedir. DBM'de yorumlanabilirliği arttırmak önceliklidir ve dilsel terim sayısı modellemenin en başında sabit olarak belirlenir. Bu yaklaşım doğruluğun azalmasına sebep olabilir. Çünkü DBM'de "yorumlanabilirlik-doğruluk değiş tokuşu" durumu söz konusudur. Terim kümesi küçükse, yorumlanabilirlik açısından kısıtlayıcı hale gelebilir. Öte yandan, terim kümesi boyutunun artması doğruluk artırır ancak yorumlanabilirliği azaltabilir. Yorumlanabilirliği korurken DBM'nin doğruluğunu artırmak zorlu bir iştir, bu nedenle ek mekanizmalar gerektirir. Literatürde, DBM doğruluğunu geliştirmek için model yapısını değiştirmeye veya veri analizi vb. teknikler kullanarak terim kümesi boyutunu ve BK şeklini ayarlamaya odaklanan çok fazla çalışma yapılmıştır (Casillas, Cordon, Herrera, & Magdalena, 2013). Model yapısının değiştirilmesine, bazı örnekleri, bulanık kural tabanlı hiyerarşik bir metodoloji kullanmak [4], sürekli dilsel terim kümeleri (DTK) formüle etmek [5] ve terimleri ölçek içinde eşit aralıklarla yerleştirilmemiş DTK'ler oluşturmak [6] gibi çalışmalar örnek verilebilir.

DBM ile ilgili diğer bir sorun, BK'lerin çekirdek ve destek noktalarının dilsel terimlere (DT) doğrudan bağımlılığıdır. Yönteme ilişkin bu kısıt, hassas modellemeyi engeller ve bilgi kaybına neden olur. Delgado vd. [7], DBM'deki bilgi kaybını en aza indirmek için DT'lere karşılık gelen BK'lerin çekirdek ve destek noktalarını, öncül ve ardıl BK'ler arasında kaydırmaya olanak veren, dilsel ve sayısal değerleri birlikte kullanan bir yaklaşım önermiştir. Herrera ve Martinez [8] bu yaklaşımı 2-öğeli DBM olarak adlandırmış ve temel işlemlerini formüle etmiştir. 2-öğeli DBM yaklaşımında, bir 2- öğeli dilsel ifade, bir dilsel terim ve buna eşlik eden bir tür kaydırma değiştiricisi olan "bilgi farkı" (BF) adlı bir sayısal değer ile temsil edilir. BF, öncül ve ardıl DT'ler arasındaki dilsel terime karşılık gelen BK'lerin kayma hareketinin ölçüsünü belirtir. Bu şekilde, BK'lerin çekirdek ve destek noktalarının konumlarının DT'lere bağımlılığı en aza indirilir ve uzmanlar nispeten küçük bir terim seti kullanarak ara değerlendirmeler yapma esnekliği kazanır. Herrera ve Martinez [9], dilsel tanımlama, tutarlılık ve doğruluk perspektiflerinde yaklaşık DBS ve 2-öğeli dilsel hesaplama modellerini (DHM) karşılaştırmış ve 2-öğeli DHM'nin tüm açılardan daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna varmıştır.

Literatürde 2-öğeli DBM ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Martinez ve Herrera [10], 2-öğeli DBM ile ilgili bazı teorik ve uygulamalı çalışmaları özetlemiştir. 2-öğeli DBM tabanlı birleştirme, dilsel hiyerarşiler, genişletilmiş dil hiyerarşileri, birleştirme ve çeviri-manipülasyon-yeniden çeviri metodolojileri, çok parçalı, heterojen ve dengesiz DTK'lerle çalışma bağlamında analiz edilmiştir. Herrera vd. [11], farklı kaynaklardan toplanan ve farklı çok parçalılık ve anlambilime sahip dilsel bilgileri birleştirmek ve yönetmek için bir füzyon yaklaşımı geliştirmiştir. Herrera ve Martinez [12], farklı DTK'ler kullanılarak üretilen çok parçalı dilsel bilginin normalizasyonunun neden olduğu bilgi kaybını azaltmak için terim kümelerinin dilsel hiyerarşileri olarak adlandırılan bir tür çok parçalı dilsel bağlam önermiştir. Herrera vd. [6] terimleri, dilsel bir hiyerarşi kullanarak atanan parametrik üyelik fonksiyonları olarak temsil ederek, dengesiz DTK'lerle bilgi kaybı olmadan çalışmak için 2-öğeli birleştirilmiş bir prosedür inşa etmiştir. Estrella vd. [13] ise çok kriterli karar verme (ÇKKV) sorunlarını çok parçalı, heterojen ve dengesiz DTK'lerle baş ederek çözmek için 2-öğeli DBM'yi benimseyen bir yazılım geliştirmiştir. Xu ve Wang [14], bazı 2-öğeli dilsel güç operatörleri önermiştir. Merigo ve Gil-Lafuente [15], birkaç dilsel toplama operatörünün bir genellemesi olarak uyarılmış 2-öğeli toplama operatörünü sunmuştur.

2-öğeli DBM'nin farklı uzantıları da geliştirilmiştir. Oransal 2-öğeli DBM ve sayısal ölçek, Martinez ve Herrera [10] tarafından 2-öğeli DBM'ye dayalı yeni DHM'ler olarak tartışılmıştır. Wang ve Hao [16], BF'yi $\alpha + \beta = 1$ 'i sağlayan bir sembolik oran çifti olan α ve β ile değiştirerek 2-öğeli DBM'nin yeni bir versiyonunu önermiştir. BK, bu orantı çiftine bağlı olarak ardışık iki terim arasında kaydırılır. Dong vd. [17], sayısal ölçek kavramına dayalı olarak 2-öğeli DBM'yi genişletmiş ve DTK'nin sayısal ölçeğini hesaplamak için bir optimizasyon modeli önermiştir. Dong ve Herrera-Viedma [18], ÇKKV problemlerinde 2-öğeli DBM'lerin sayısal ölçeklerini belirlemek için otomatik bir mekanizma geliştirmiştir. 2-öğeli DBM, literatürde karar verme problemleri için sezgisel BK'ler [19], pisagor BK'ler [20], resim BK'ler [21] ve çift kutuplu BK'ler [22] ile birleştirilmiştir.

2-öğeli DBM doğruluğu artırsa da, melez sayısal-sözel ifadeler kullanılması nedeniyle "kelimelerle hesaplama" yaklaşımıyla tam olarak örtüşmez. Oysa "kelimelerle hesaplama" yaklaşımında uzmanlar, "daha az", "daha fazla", "+", "-", "daha yüksek", "daha düşük" gibi karşılaştırılabilir sözel kelimeler veya sembollerle özgürce düşünülmelidir. Bu çalışmada, 2-öğeli DBM'nin değiştirilmiş ve daha kapsayıcı bir sürümü olan dilsel BF'ye sahip "2-öğeli tam DBM" yaklaşımı önerilmiştir ve matematik çerçevesi oluşturulmuştur. Bu matematik çerçeveyi temel alarak 2-öğeli tam dilsel sezgisel bulanık modelleme (DSBM) de önerilmiştir. Önerilen bu yeni modelleme yaklaşımı, insan faktörü içeren gerçek hayat problemlerinde kullanılmaya daha elverişlidir.

Bu çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de, 2-öğeli DBM hakkında kısa bir bilgi verilmiş, önerilen 2-öğeli tam DBM tanımlanmış ve sıradan 2-öğeli DBM'ye dönüşüm sunulmuştur. Ayrıca birden fazla 2-öğeli tam dilsel ifadeyi toplamak için operatörler önerilmiştir. Bölüm 3'te, 2-öğeli tam DSBM sunulmuş ve Bölüm 4'te bir sayısal örnek üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışma önerileri Bölüm 5'te verilmiştir.

2. 2-ÖĞELİ TAM DİLSEL BULANIK MODELLEME (2-TUPLE FULL LINGUISTIC FUZZY MODELING)

BK teorisinde, belirsizlik $[0,1]$ aralığında tanımlı sürekli bir üyelik fonksiyonu ile modellenir. Her bir küme elemanının bu fonksiyon ile belirlenen bir üyelik derecesi (ÜD) vardır. Bir küme elemanı kümeye kısmi olarak üye olabilir. Üyelik derecesi büyük ise belirsizlik düşük, aksi halde belirsizlik yüksektir. Her bir eleman için ÜD ve üye olmama derecelerinin (ÜOD) toplamı 1'e eşittir [1].

İnsanların dahil olduğu olaylar için sözlü yargıların sayısal ifadelerle dönüştürülmesinde güçlük yaşanır. Bu gibi durumlarda, dilsel bulanık yaklaşım yararlı olabilir. Dilsel bulanık değişken yaklaşımında, değişkenlere yönelik değerlendirmeler bir dildeki kelimeler veya tümcelerdir [2]. Bulanık dilsel yaklaşım, DTK'ler yardımıyla formüle edilir.

Tanım 1: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ sıralı yapıda bir DTK ve $Neg(s_i)$ olumsuzluk operatörü olsun. S kümesi şu koşulları sağlamalıdır [8]:

- $Neg(s_i) = s_j$ ve $j = g - i$.
- $s_i \leq s_j \Leftrightarrow i \leq j$.

DTK'ler normal şartlarda sadece DT'lere karşılık gelen değerlendirmeler yapmaya olanak tanır. Ara değerlendirmeler yapabilmek için dilsel değiştiriciler önerilmiştir.

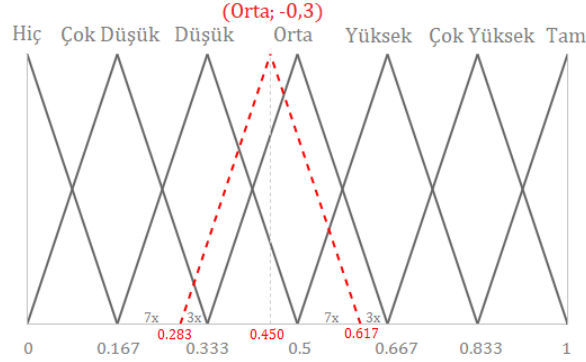
Tanım 2: $\alpha \in \mathbb{R}$ bir gerçek sayı, $\mathcal{F}(X)$, X uzayında tanımlı tüm BK'lerin sınıfı ve $\tilde{A} \in \mathcal{F}(\mathbb{R})$ bir BK olsun. Bir kaydırma değiştirici operatörü $M_\alpha, \mathcal{F}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{F}(\mathbb{R})$ arasında $M_\alpha(\tilde{A}(x)) = \tilde{A}(x - \alpha), \forall x \in \mathbb{R}$ şeklinde bir eşleştirme olarak tanımlanır [23].

2-öğeli DBM, Herrera ve Martinez [8] tarafından dilsel bilgiyi 2-öğeli bir formatta ($s \in S; \alpha$) karakterize etmek için önerilmiştir. Burada s , bir DTK olan S 'e ait bir DT'dir ve α , bir değiştirici olarak işlev gören gerçek bir sayıdır. Aşağıdaki tanımlar, 2-öğeli DBM'nin genel özelliklerini sunar.

Tanım 3: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ sıralı yapıda bir DTK, $\alpha \in [-0,5; 0,5]$ BF terimi, $A_{s_i \in S} = (s_i; \alpha)$ bir 2-öğeli dilsel ifade, $f_{s_i \in S}$ s_i dilsel terimine karşılık gelen BK, $F^-(s_i) = \{f_{i_j}^-\} = \{f_{i_0}^-, \dots, f_{i_g}^-\}, [s_{i-1}, s_i)$ aralığında eşit aralıklarla konumlandırılmış ardışık 10 adet BK içeren bir küme ve $F^+(s_i) = \{f_{i_j}^+\} = \{f_{i_0}^+, \dots, f_{i_g}^+\}, (s_i, s_{i+1}]$ aralığında eşit aralıklarla konumlandırılmış ardışık 10 adet BK içeren bir küme olsun. $A_{s_i \in S}$ 'ye karşılık gelen BK, Denklem (1)'deki gibi bulunur:

$$f_{s_i \in S} = \begin{cases} f_{10 \times (1-\alpha)}^- & , \alpha < 0 \\ f_{s_i} & , \alpha = 0 \\ f_{10 \times \alpha}^+ & , \alpha > 0 \end{cases} \quad (1)$$

Örnek 1: $A_s = (Orta; -0,3)$ dilsel ifadesine karşılık gelen BK, Herrera ve Martinez [8] tarafından önerilen DTK kullanılarak Şekil 1’de görüldüğü gibi elde edilir.



Şekil 1. $(Orta; -0,3)$ 2-öğeli dilsel ifadesine karşılık gelen bulanık küme

Tanım 4: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ sıralı yapıda bir DTK ve $\beta \in [0, g]$ bir gerçek sayı olsun. β sayısına karşılık gelen $A_{s \in S} = (s_i; \alpha \in [-0,5; 0,5])$ 2-öğeli dilsel ifadesi Denklem (2)’deki gibi bulunur [8].

$$\Delta(\beta) = (s_{i=\text{round}(\beta)}; \alpha = \beta - i) = A_{s \in S} \quad (2)$$

Tanım 5: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK ve $A_{s \in S} = (s_i; \alpha)$ bir 2-öğeli dilsel ifade olsun. 2-öğeli ifadeleri eşdeğer sayısal $\beta \in [0, g] \subset \mathcal{R}$ karşılıklarına dönüştüren Δ^{-1} fonksiyonu Denklem (3)’teki gibi tanımlanır [8]:

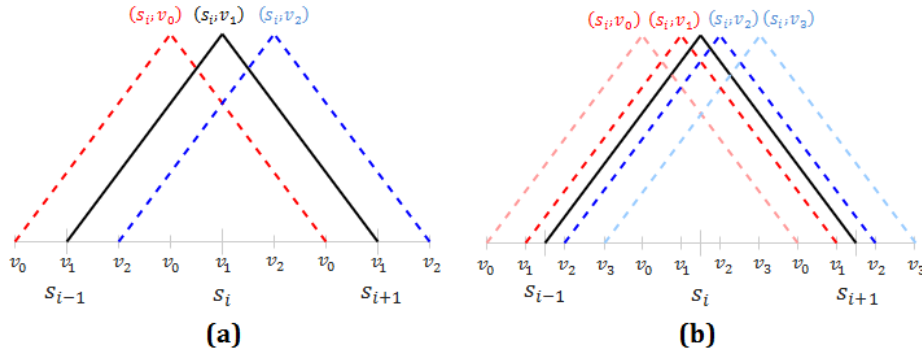
$$\Delta^{-1}(A_{s \in S}) = \Delta^{-1}(s_i; \alpha) = i + \alpha = \beta \quad (3)$$

Tanım 6: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK ve $x_j = \{x_1, \dots, x_n\}$ dilsel ifadeler olsun. Bu n adet dilsel ifadenin aritmetik ortalaması (\bar{x}) eğer ifadeler olağan dilsel ifade ise Denklem (4)’teki gibi [24], eğer 2-öğeli dilsel ifade ($x_j = A_{j \in S} = (r_j; \alpha_j)$) ise Denklem (5)’teki gibi hesaplanır [8]:

$$\bar{x} = \begin{cases} \frac{x_{n+1}}{2}, & n \text{ tek sayı} \\ \frac{1}{2}(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}), & n \text{ çift sayı} \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \Delta \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{n} \Delta^{-1}(A_{j \in S}) \right) = \Delta \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{n} \Delta^{-1}(r_j; \alpha_j) \right) = \Delta \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \beta_j \right) \quad (5)$$

2-öğeli DBM yaklaşımı melez bir sayısal-sözel yapısı olması nedeniyle tam anlamıyla dilsel bir modelleme yaklaşımı değildir. Çünkü dilsel modellemede sözlü anlamlara sahip kelime veya sembollerle özgürce değerlendirme yapılabilir. Amerikan harf derecelendirme sisteminin artı (+) veya eksi (-) ile ifade edilen ikinci kısmı, sembollerin kaydırma değiştiricileri olarak kullanılmasına uygulanabilir iyi bir örnek olabilir. Bu çalışma kapsamında L2TS’ler dilsel BF’ye sahip olacak şekilde modifiye edilmiştir. Önerilen 2-öğeli tam DBM yaklaşımında, BF sadece kelimelerden veya sembollerden oluşur. Bu nedenle, bir 2-öğeli tam dilsel bulanık ifade, bir çift dilsel değişkenden oluşur. Şekil 2’de, 3 ve 4 elemana sahip ikincil terim kümelerine sahip örnek 2-öğeli tam dilsel bulanık ifadeleri gösterilmektedir.



Şekil 2. (a) 3 ve (b) 4 elemanlı ikincil terim kümesine sahip örnek 2-öğeli tam dilsel ifadeler

Tanım 7: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil bir DTK, $A_{s_i \in S, v_j \in V} = (s_i; v_j)$ bir 2-öğeli tam dilsel ifade, f_{s_i}, s_i dilsel terimine karşılık gelen BK, $F^-(s_i) = \{f_{i_k}^-\} = \{f_{i_0}^-, \dots, f_{i_{n-1}}^-\}$, $[s_{i-1}, s_i]$ aralığında eşit aralıklarla konumlandırılmış ardışık 10 adet BK içeren bir küme ve $F^+(s_i) = \{f_{i_k}^+\} = \{f_{i_0}^+, \dots, f_{i_n}^+\}$, $[s_i, s_{i+1}]$ aralığında eşit aralıklarla konumlandırılmış ardışık 10 adet BK içeren, $f_{i_{n-1}}^-$ ile $f_{i_0}^+$ arasındaki mesafe $f_{i_k}^-$ 'ler arasındaki ifadeler ile eşit olan bir küme olsun. $A_{s_i \in S, v_j \in V}$ 'ye karşılık gelen BK Denklem (6)'daki gibi bulunur:

$$f_{A_{s_i \in S, v_j \in V}} = \begin{cases} f_{(j + \lfloor \frac{n}{2} \rfloor + 1)}^- & , j < \frac{n}{2} \\ f_{s_i} = f_0^+ & , j = \frac{n}{2} \\ f_{(j - \lfloor \frac{n}{2} \rfloor)}^+ & , j > \frac{n}{2} \end{cases} \quad (6)$$

Burada $\lfloor . \rfloor$ ifadesi kendisinden küçük en yakın tamsayıya yuvarlama işlemini temsil etmektedir.

Tanım 8: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_{s \in S, v \in V} = (s_i; v_j)$ bir 2-öğeli tam dilsel ifade olsun. Eşdeğer bir 2-öğeli dilsel $A'_{s \in S} = (s_i; \alpha)$ ifadesi Denklem (7)'deki dönüşüm ile elde edilir:

$$A_{s \in S, v \in V} = (s_i; v_j) \equiv A'_{s \in S} = \left(s_i; \alpha = \begin{cases} \left(j - \frac{n+1}{2} \right) \left(\frac{1}{n+1} \right) & , n \text{ tek sayı} \\ \left(j - \frac{n}{2} \right) \left(\frac{1}{n+1} \right) & , n \text{ çift sayı} \end{cases} \right) \quad (7)$$

Tanım 9: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK olsun. Verilen bir $\beta \in [0, g] \subset \mathcal{R}$ gerçekte sayısına en yakın eşdeğer 2-öğeli tam dilsel $A_{s \in S, v \in V} = (s_i; v_j)$ ifadesini veren Δ fonksiyonu Denklem (8)'deki gibi tanımlanır:

$$\Delta(\beta) = A_{s \in S, v \in V} = (s_{i=\lfloor \beta \rfloor}; v_{j=\lfloor (\beta - i + 0,5) \times (n+1) - 0,5 \rfloor}) \quad (8)$$

Burada $\lfloor . \rfloor$ ifadesi en yakın tamsayıya yuvarlama işlemini temsil etmektedir.

Tanım 10: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_{s \in S, v \in V} = (s_i; v_j)$ bir 2-öğeli tam dilsel ifade olsun. 2-öğeli tam dilsel ifadeleri eşdeğer $\beta \in [0, g] \subset \mathcal{R}$ gerçekte sayısına dönüştüren Δ^{-1} fonksiyonu Denklem (9)'daki gibi tanımlanır:

$$\Delta^{-1}(A_{s \in S, v \in V}) = \Delta^{-1}(s_i; v_j) = i - 0,5 + \frac{j+0,5}{n+1} = \beta \quad (9)$$

Örnek 2: $S = \{s_i\} = \{\text{hiç, düşük, orta, yüksek, tam}\}$ birincil DTK ve $V = \{v_j\} = \{-, =, +\}$ BF'ye ilişkin sembolik terimler içeren ikincil DTK olarak tanımlanmıştır. $\beta_1 = 2,538$, $\beta_2 = 2,875$ ve $\beta_3 = 3,438$ sayılarının en yakın eşdeğer 2-öğeli tam dilsel ifadeleri (10-12) no'lu Denklemlerdeki gibi elde edilir. (yüksek; -), (yüksek; =) ve (yüksek; +) 2-öğeli tam dilsel ifadelerine karşılık gelen sayısal değerler (13-15) no'lu Denklemlerdeki gibi elde edilir:

$$\Delta(2,538) = (s_{i=\lfloor 2,538 \rfloor} = 3; v_{j=\lfloor (2,538 - 3 + 0,5) \times 3 - 0,5 \rfloor = 0}) = (\text{yüksek}; -) \quad (10)$$

$$\Delta(2,875) = (s_{i=\lfloor 2,875 \rfloor} = 3; v_{j=\lfloor (2,875 - 3 + 0,5) \times 3 - 0,5 \rfloor = 1}) = (\text{yüksek}; =) \quad (11)$$

$$\Delta(3,438) = (s_{i=\lfloor 3,438 \rfloor} = 3; v_{j=\lfloor (3,438 - 3 + 0,5) \times 3 - 0,5 \rfloor = 2}) = (\text{yüksek}; +) \quad (12)$$

$$\Delta^{-1}(\text{yüksek}; -) = 3 - 0,5 + \frac{0+0,5}{3} = 2, \bar{6} \quad (13)$$

$$\Delta^{-1}(\text{yüksek}; =) = 3 - 0,5 + \frac{1+0,5}{3} = 3 \quad (14)$$

$$\Delta^{-1}(\text{yüksek}; +) = 3 - 0,5 + \frac{2+0,5}{3} = 3, \bar{3} \quad (15)$$

2-öğeli DBM, olumsuzluk ve karşılaştırma adı verilen iki temel operatöre sahiptir. Bu operatörler, aşağıda ayrıntılı olarak açıklandığı gibi değiştirilmiş 2-öğeli tam DBM için genişletilmiştir.

Tanım 11: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_{s \in S, v \in V} = (s_i; v_j)$ bir 2-öğeli tam dilsel ifade olsun. 2-öğeli tam dilsel ifadeler için olumsuzluk operatörü Denklem (16)'daki gibi tanımlanır:

$$Neg(A = (s_i; v_j)) = \Delta(g - \Delta^{-1}(s_i; v_j)) \tag{16}$$

Örnek 3: $S = \{s_i\} = \{\text{hiç, düşük, orta, yüksek, tam}\}$ birincil DTK ve $V = \{v_j\} = \{-, =, +\}$ BF'ye ilişkin sembolik terimler içeren ikincil DTK olarak tanımlanmıştır. 2-öğeli tam dilsel (yüksek; -), (yüksek; =) ve (yüksek; +) ifadeleri için olumsuzluk ifadeleri (17-19) no'lu denklemlerdeki gibi elde edilir:

$$Neg(\text{yüksek; -}) = \Delta(4 - \Delta^{-1}(\text{yüksek; -})) = \Delta(4 - 2, \bar{6}) = (\text{düşük; +}) \tag{17}$$

$$Neg(\text{yüksek; =}) = \Delta(4 - \Delta^{-1}(\text{yüksek; =})) = \Delta(4 - 3) = (\text{düşük; =}) \tag{18}$$

$$Neg(\text{yüksek; +}) = \Delta(4 - \Delta^{-1}(\text{yüksek; +})) = \Delta(4 - 3, \bar{3}) = (\text{düşük; -}) \tag{19}$$

2-öğeli tam dilsel ifadeler, 9 no'lu denklem yardımıyla eşdeğer sayısal değerlere dönüştürülerek karşılaştırılabilir. Ancak 20 no'lu denklemde sunulan kurallar kullanılarak, sayısal değerlere çevirmeksizin doğrudan da karşılaştırılabilirler.

Tanım 12: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK, $A = (s_{i_1}; v_{j_1})$ ve $B = (s_{i_2}; v_{j_2})$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler olsun. İfadeler arasındaki karşılaştırma operatörü Denklem (20)'deki gibi tanımlanır:

$$Comp(A = (s_{\alpha}; v_{\beta}), B = (s_k; v_l)) = \begin{cases} A < B & , \alpha_1 < \alpha_2 \\ A > B & , \alpha_1 > \alpha_2 \\ A < B & , \alpha_1 = \alpha_2 \text{ ve } \beta_1 < \beta_2 \\ A > B & , \alpha_1 = \alpha_2 \text{ ve } \beta_1 > \beta_2 \\ A = B & , \alpha_1 = \alpha_2 \text{ ve } \beta_1 = \beta_2 \end{cases} \tag{20}$$

Örnek 4: $S = \{s_i\} = \{\text{hiç, düşük, orta, yüksek, tam}\}$ birincil DTK ve $V = \{v_j\} = \{-, =, +\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK olsun. $A = (s_3; v_2) = (\text{yüksek; +})$, $B = (s_3; v_1) = (\text{yüksek; =})$, $C = (s_2; v_2) = (\text{orta; +})$ ve $D = (s_3; v_0) = (\text{yüksek; -})$ dilsel ifadeleri arasındaki sıralama Denklem (13) yardımıyla $C < D < B < A$ olarak elde edilir.

Tanım 13: Let $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK, $A = (s_{i_1}; v_{j_1})$ ve $B = (s_{i_2}; v_{j_2})$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler ve $\lambda_1, \lambda_2 [0,1]$ aralığında skaler değerler olsun. 2-öğeli tam dilsel ifadeler arasındaki Toplama ve Çarpma işlemleri (21-23) no'lu denklemlerde tanımlanmıştır:

$$A \oplus B = \Delta\left(\frac{\Delta^{-1}(s_{i_1}; v_{j_1}) + \Delta^{-1}(s_{i_2}; v_{j_2})}{2}\right) \tag{21}$$

$$\lambda_1 A \oplus \lambda_2 B = \Delta\left(\frac{\lambda_1 \times \Delta^{-1}(s_{i_1}; v_{j_1}) + \lambda_2 \times \Delta^{-1}(s_{i_2}; v_{j_2})}{\lambda_1 + \lambda_2}\right) \tag{22}$$

$$A \otimes B = \Delta\left(\sqrt{\Delta^{-1}(s_{i_1}; v_{j_1}) \times \Delta^{-1}(s_{i_2}; v_{j_2})}\right) \tag{23}$$

2-öğeli tam dilsel ifadeleri KV problemlerinde kullanabilmek için toplama operatörlerine ihtiyaç vardır. Takip eden tanımlarda aritmetik ve geometrik toplama operatörleri formüle edilmiştir.

Tanım 14: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k}), (k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi olsun. Dilsel 2-öğeli Ortalama Toplama Operatörü (L2TA) Denklem (24)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TA(A_1, A_2, \dots, A_m) = \oplus_{k=1}^m A_k = A_1 \oplus A_2 \oplus \dots \oplus A_m = \Delta\left(\frac{1}{m} \times \sum_{k=1}^m \Delta^{-1}(A_k)\right) \tag{24}$$

Tanım 15: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k}), (k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi ve $w_k = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ ise A_k 'lere ait

ağırlıklar olsun. Dilsel 2-öğeli Ağırlıklı Ortalama Toplama Operatörü (L2TWA) Denklem (25)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TWA(w_1A_1, w_2A_2, \dots, w_mA_m) = \bigoplus_{k=1}^m w_k A_k = \Delta \left(\frac{\sum_{k=1}^m (w_k \times \Delta^{-1}(A_k))}{\sum_{k=1}^m (w_k)} \right) \quad (25)$$

Tanım 16: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k})$, $(k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi ve $w_k \in [0,1] = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ ise A_k 'lere ait $\sum w_k = 1$ eşitliğini sağlayan ağırlıklar olsun. Dilsel 2-öğeli Sıralı Ağırlıklı Ortalama Toplama Operatörü (L2TOWA) Denklem (26)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TOWA(w_1A_{(1)}, w_2A_{(2)}, \dots, w_mA_{(m)}) = \bigoplus_{k=1}^m w_k A_{(k)} = \Delta \left(\sum_{k=1}^m (w_k \times \Delta^{-1}(A_{(k)})) \right) \quad (26)$$

Burada $A_{(k)}$, k . büyük 2-öğeli tam dilsel ifadeyi ve w_k ise k . Pozisyona ait ağırlık değerini temsil eder.

Tanım 17: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k})$, $(k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi olsun. Dilsel 2-öğeli Geometrik Toplama Operatörü (L2TG) Denklem (27)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TG(A_1, A_2, \dots, A_m) = \bigotimes_{k=1}^m A_k = \Delta \left(\left(\prod_{k=1}^m \Delta^{-1}(A_k) \right)^{1/m} \right) \quad (27)$$

Tanım 18: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k})$, $(k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi ve $w_k = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ ise A_k 'lere ait ağırlıklar olsun. Dilsel 2-öğeli Ağırlıklı Geometrik Toplama Operatörü (L2TWG) Denklem (28)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TWG(w_1A_1, w_2A_2, \dots, w_mA_m) = \bigotimes_{k=1}^m w_k \times A_k = \Delta \left(\left(\prod_{k=1}^m (\Delta^{-1}(A_k))^{w_k} \right)^{1/\sum_{k=1}^m (w_k)} \right) \quad (28)$$

Tanım 19: $S = \{s_i\} = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK ve $A_k = (s_{i_k}; v_{j_k})$, $(k = 1, 2, \dots, m)$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler kümesi ve $w_k \in [0,1] = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ ise A_k 'lere ait $\sum w_k = 1$ eşitliğini sağlayan ağırlıklar olsun. Dilsel 2-öğeli Sıralı Ağırlıklı Geometrik Toplama Operatörü (L2TOWG) Denklem (29)'deki gibi tanımlanır:

$$L2TOWG(w_1A_{(1)}, w_2A_{(2)}, \dots, w_mA_{(m)}) = \bigoplus_{k=1}^m w_m \times A_{(k)} = \Delta \left(\prod_{k=1}^m (\Delta^{-1}(A_k))^{w_k} \right) \quad (29)$$

Burada $A_{(k)}$, k . büyük 2-öğeli tam dilsel ifadeyi ve w_k ise k . Pozisyona ait ağırlık değerini temsil eder.

Örnek 5: $S = \{s_i\} = \{\text{hiç}, \text{düşük}, \text{orta}, \text{yüksek}, \text{tam}\}$ birincil DTK, $V = \{v_j\} = \{-, =, +\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK, $A_k = \{(\text{yüksek}; -), (\text{tam}; -), (\text{düşük}; +), (\text{orta}; =)\}$ 2-öğeli tam dilsel ifadeler, $w_k = \{4, 7, 3, 6\}$ A_k 'lere ait ağırlıklar ve $w'_k = \{0,2; 0,35; 0,15; 0,3\}$ pozisyonlara ait $\sum w_k = 1$ eşitliğini sağlayan ağırlıklar olarak tanımlanmıştır. L2TA, L2TWA, L2TOWA, L2TG, L2TWG, L2TOWG değerleri sırasıyla (30-35) no'lu Denklemlerdeki gibi hesaplanır:

$$L2TA((\text{yüksek}; -), (\text{tam}; -), (\text{düşük}; +), (\text{orta}; =)) = \Delta \left(\frac{(2, \bar{6} + 3, \bar{6} + 1, \bar{3} + 2)}{4} \right) = \Delta(2,417) = (\text{orta}; +) \quad (30)$$

$$L2TWA((4) \times (\text{yüksek}; -), (7) \times (\text{tam}; -), (3) \times (\text{düşük}; +), (6) \times (\text{orta}; =)) = \Delta \left(\frac{4 \times 2, \bar{6} + 7 \times 3, \bar{6} + 3 \times 1, \bar{3} + 6 \times 2}{20} \right) = \Delta(2,617) = (\text{yüksek}; -) \quad (31)$$

$$L2TOWA((0,2) \times (\text{tam}; -), (0,35) \times (\text{yüksek}; -), (0,15) \times (\text{orta}; =), (0,3) \times (\text{düşük}; +)) = \Delta(0,2 \times 3, \bar{6} + 0,35 \times 2, \bar{6} + 0,15 \times 2 + 0,3 \times 1, \bar{3}) = \Delta(2,367) = (\text{orta}; +) \quad (32)$$

$$L2TG((\text{yüksek}; -), (\text{tam}; -), (\text{düşük}; +), (\text{orta}; =)) = \Delta \left((2, \bar{6} \times 3, \bar{6} \times 1, \bar{3} \times 2)^{1/4} \right) = \Delta(2,260) = (\text{orta}; +) \quad (33)$$

$$L2TWG((4) \times (\text{yüksek}; -), (7) \times (\text{tam}; -), (3) \times (\text{düşük}; +), (6) \times (\text{orta}; =)) \\ = \Delta((2, \bar{6}^4 \times 3, \bar{6}^7 \times 1, \bar{3}^3 \times 2^6)^{1/20}) = \Delta(2,465) = (\text{orta}; +) \quad (34)$$

$$L2TOWG((0,2) \times (\text{tam}; -), (0,35) \times (\text{yüksek}; -), (0,15) \times (\text{orta}; =), (0,3) \times (\text{düşük}; +)) \\ = \Delta(3, \bar{6}^{0.2} \times 2, \bar{6}^{0.35} \times 2^{0.15} \times 1, \bar{3}^{0.3}) = \Delta(2,211) = (\text{orta}; +) \quad (35)$$

3. 2-ÖĞELİ TAM DİLSEL SEZGİSEL BULANIK MODELLEME (2-TUPLE FULL LINGUISTIC INTUITIONISTIC FUZZY MODELING)

Gerçek hayattaki bazı durumlarda bir küme elemanına ilişkin (ÜD) ve (ÜOD)'nin toplamı 1'e eşit olacak şekilde belirlemek mümkün olmayabilir. Bu durum eksik bilgi durumu olarak tanımlanır. Sezgisel BK'ler (SBK) bu durumu modellemek için önerilmiştir [25].

Tanım 20: X tanım uzayı, $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$ üyelik fonksiyonu ve $\vartheta_{\tilde{A}}(x)$ üye olmama fonksiyonu olsun. Bir SBK, $\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x), \vartheta_{\tilde{A}}(x) \mid x \in X\}$ şeklinde tanımlanır ve Denklem (36)'daki koşulu sağlar [25]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) + \vartheta_{\tilde{A}}(x) \leq 1 \quad (36)$$

SBK'lar için ÜD ve ÜOD'nin toplamı 1'e eşit olmadığı için, birden fazla SBK'nın büyüklüğünün sıralanması zorlaşmaktadır. Bu tip bir sıralama için farklı yaklaşımlar olmasına karşın en yaygın yaklaşım Skor ve Doğruluk fonksiyonları kullanarak karşılaştırmaktır.

Tanım 21: \tilde{A} bir SBK olsun. \tilde{A} için Skor fonksiyonu ($S_{\tilde{A}}(x)$) ve Doğruluk fonksiyonu ($H_{\tilde{A}}(x)$) (37) ve (38) no'lu Denklemlerdeki gibi tanımlanır [26]:

$$S_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) - \vartheta_{\tilde{A}}(x) \quad (37)$$

$$H_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) + \vartheta_{\tilde{A}}(x) \quad (38)$$

Tanım 22: \tilde{A} ve \tilde{B} iki SBK olsun. \tilde{A} ve \tilde{B} aşağıdaki kurallara göre sıralanabilir [26]:

- Eğer $S_{\tilde{A}}(x) > S_{\tilde{B}}(x) \Rightarrow \tilde{A} > \tilde{B}$
- Eğer $S_{\tilde{A}}(x) = S_{\tilde{B}}(x)$
 - Eğer $H_{\tilde{A}}(x) > H_{\tilde{B}}(x) \Rightarrow \tilde{A} > \tilde{B}$
 - Eğer $H_{\tilde{A}}(x) = H_{\tilde{B}}(x) \Rightarrow \tilde{A} = \tilde{B}$

SBK'lerin dilsel modellemede kullanılması için çalışmalar da mevcuttur. Beg ve Rashid [19], 2-öğeli DBM'yi SBK'ler için uyarlamıştır. Bu yaklaşımda ÜD ve ÜOD birbirinden ayrı 2-öğeli ifadeler ile temsil edilmektedir.

Tanım 23: $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK ve (s_i, s_j) bir sezgisel dilsel ifade ve $\alpha, \eta \in [-0,5; 0,5]$ aralığında gerçek sayılar olsun. Bir 2-öğeli dilsel sezgisel ifade Denklem (39)'daki gibi tanımlanır [19]:

$$A_{s \in S} = \langle (s_i; \alpha), (s_j; \eta) \rangle \quad (39)$$

Tanım 24: $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK ve $A_{s \in S} = \langle (s_i; \alpha), (s_j; \eta) \rangle$ bir 2-öğeli dilsel sezgisel ifade ve β, δ gerçek sayılar olsun. 2-öğeli ifadeleri eşdeğer sayısal $\beta \in [0, g] \subset \mathcal{R}$ karşılıklarına dönüştüren Δ^{-1} fonksiyonu ve bu fonksiyonun tersi olan Δ fonksiyonu sırasıyla Denklem (40) ve (41)'deki gibi tanımlanır [19]:

$$\Delta^{-1} \left(\langle (s_i; \alpha), (s_j; \eta) \rangle \right) = (\beta; \delta) \quad (40)$$

$$\Delta(\beta; \delta) = \langle (s_i; \alpha), (s_j; \eta) \rangle \quad (41)$$

Burada $[\cdot]$ ifadesi en yakın tamsayıya yuvarlama işlemini temsil etmek üzere $i = \lfloor \beta \rfloor$, $j = \lfloor \eta \rfloor$ ve $\alpha = \beta - i$, $\eta = \delta - j$ olarak hesaplanır.

Tanım 25: $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK olsun. Bir 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifade Denklem (42)'deki gibi tanımlanır:

$$A_{S \in S, v \in V} = \left((s_i; v_a), (s_j; v_b) \right) \quad (42)$$

Tanım 26: $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ birincil DTK, $V = \{v_0, \dots, v_n\}$ BF'ye ilişkin ikincil DTK olsun. Verilen bir $(\beta; \delta)$ sezgisel sayı çiftine en yakın eşdeğer 2-öğeli tam dilsel sezgisel $A_{S \in S, v \in V} = \left((s_i; v_a), (s_j; v_b) \right)$ ifadesini veren Δ fonksiyonu ve bu fonksiyonun tersi olan Δ^{-1} fonksiyonu sırasıyla Denklem (43) ve (44)'deki gibi tanımlanır:

$$\Delta(\beta, \delta) = \left((s_{i=\lfloor \beta \rfloor}; v_{a=\lfloor (\beta-i+0,5) \times (n+1) - 0,5 \rfloor}), (s_{j=\lfloor \delta \rfloor}; v_{b=\lfloor (\delta-j+0,5) \times (n+1) - 0,5 \rfloor}) \right) \quad (43)$$

$$\Delta^{-1}(A_{S \in S, v \in V}) = (\beta; \delta) = \left(i - 0,5 + \frac{a+0,5}{n+1}; j - 0,5 + \frac{b+0,5}{n+1} \right) \quad (44)$$

2-öğeli tam dilsel sezgisel ifadelerin Δ^{-1} yardımıyla dönüştürüldüğü $(\beta; \delta)$ sezgisel sayı çifti, bir SBK'dır. Dolayısıyla birden fazla 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifade, sayısal karşılıklarına dönüştürüldüğünde Tanım 22'de verilen kurallar ile sıralanabilir. Skor ve doğruluk fonksiyonlarının 2-öğeli tam DSBM için uyarlanması ile bu karşılaştırma işlemi daha pratik hale gelebilir. Ayrıca, Beg ve Rashid [19], dilsel ifadeleri sayısal karşılıklarına çevirmeden de karşılaştırma yapmaya olanak sağlayan kural kümesi sunmuştur. Bu kurallar, 2-öğeli tam DSBM için de kullanılabilir.

Tanım 27: Verilen bir $A_{S \in S, v \in V}$ 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifadesine karşılık gelen sezgisel sayı çifti $(\beta; \delta)$ olsun. Bu ifade için Skor fonksiyonu ($S_{A_{S \in S, v \in V}}$) ve Doğruluk fonksiyonu ($H_{A_{S \in S, v \in V}}$) (45) ve (46) no'lu Denklemlerdeki gibi tanımlanır:

$$S_{A_{S \in S, v \in V}} = \beta - \delta \quad (45)$$

$$H_{A_{S \in S, v \in V}} = \beta + \delta \quad (46)$$

2-öğeli tam DSBM, 2-öğeli DSBM'nin genelleştirilmiş versiyonudur. Bu sebeple birden fazla dilsel ifade arasındaki işlemler Beg ve Rashid [19] tarafından sunulan işlemlerin uyarlanması ile elde edilebilir. Fakat belirtilmelidir ki Beg ve Rashid tarafından sunulan tanımlar kullanılarak yapılan çarpma ve toplama işlemleri sonucunda elde edilen değerler dilsel terim kümesinin tanım aralığının dışına çıkabilmektedir. Bu durumda elde edilen değerler için Δ ve Δ^{-1} fonksiyonları kullanılamaz hale gelir. Takip eden tanımlar, bu durum oluşmayacak şekilde düzenlenerek oluşturulmuştur.

Tanım 28: $S = \{s_0, \dots, s_g\}$ bir DTK, $(\beta_A; \delta_A)$, $(\beta_B; \delta_B)$ sezgisel sayı çiftleri, $A = \left((s_{i_1}; v_{a_1}), (s_{j_1}; v_{b_1}) \right)$, $B = \left((s_{i_2}; v_{a_2}), (s_{j_2}; v_{b_2}) \right)$ 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifadeler ve $\lambda, \lambda_1, \lambda_2$ ise $[0,1]$ aralığında skaler değerler olsun. 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifadeler arasındaki Toplama ve Çarpma işlemleri (47-49) no'lu denklemlerde tanımlanmıştır:

$$A \oplus B = \Delta \left(\frac{\beta_A + \beta_B}{2}; \frac{\delta_A + \delta_B}{2} \right) \quad (47)$$

$$\lambda_1 A \oplus \lambda_2 B = \Delta \left(\frac{\lambda_1 \times \beta_A + \lambda_2 \times \beta_B}{\lambda_1 + \lambda_2}; \frac{\lambda_1 \times \delta_A + \lambda_2 \times \delta_B}{\lambda_1 + \lambda_2} \right) \quad (48)$$

$$A \otimes B = \Delta \left(\sqrt{\beta_A \times \beta_B}; \sqrt{\delta_A \times \delta_B} \right) \quad (49)$$

KV problemlerinde 2-öğeli tam dilsel sezgisel ifadeleri kullanabilmek için (24-29) no'lu Denklemlerdeki aritmetik ve geometrik toplama operatörleri kullanılabilir. Fakat burada, dilsel ifadeler arasındaki işlemlerin (47-49) no'lu Denklemlere göre ve sayısal karışıklara dönüşüm işlemlerinin (43-44) no'lu Denklemlere göre yapılması gerekmektedir.

4. UYGULAMA: HİDROJEN ENERJİSİ DEPOLAMA ALTERNATİFİ SEÇİMİ (APPLICATION: SELECTION OF HYDROGEN ENERGY STORAGE ALTERNATIVE)

Önerilen yaklaşım, Gümüş vd. [27] tarafından ele alınan hidrojen enerjisi depolama alternatifi seçimi probleminin bir benzeri üzerinde uygulanmıştır. Hidrojen enerjisi yatırımları tüm dünya için yeni bir problem olduğu için belirsizliği yüksek ve karar vermesi zor problemler içerir. Uzmanların konuyla ilgili yetersizlikleri dolayısıyla eksik veri durumu oluşabilir. Bu sebeple SBK ile modellemeye uygun problemlerdir.

Önerilen karar verme yaklaşımında, birbirinin olumlu-olumsuz eşleniği olan kriter grupları için değerlendirmeler alınıp birleştirilerek SBK haline getirilir. Böylece değerlendirmelerin tersinden sağlanması yapılmış olur ve eksik bilgi durumu göz ardı edilmemiş olur.

Ele alınan problemde ağırlıkları sırasıyla 0,3, 0,4 ve 0,3 olan “Depolama Verimliliği-Fire Oranı”, “Güvenlik-Tehlike”, “Ekonomik Sürdürülebilirlik- Birim Depolama Maliyeti” kriter grupları üzerinden değerlendirme yapılmıştır ve “Sıkıştırılmış Gaz”, “Metal Hidrit”, “Kimyasal Hidrojen” depolama seçenekleri arasında tercih yapılmıştır. Değerlendirmeler, karar ağırlıkları sırasıyla 0,45, 0,35 ve 0,2 olan 3 uzman tarafından gerçekleştirilmiş ve değerlendirmeler Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen dilsel terim kümeleri aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Birincil dilsel terim kümesi

| Dilsel Terim | Kısaltma | β |
|--------------|----------|---------|
| Aşırı Düşük | AD | 0 |
| Düşük | D | 1 |
| Orta | O | 2 |
| Yüksek | Y | 3 |
| Aşırı Yüksek | AY | 4 |

Tablo 2. Bilgi farkı için ikincil dilsel terim kümesi

| Dilsel Terim | Kısaltma | δ |
|---------------|----------|----------|
| Altında | A | -0,4 |
| Biraz Altında | BA | -0,2 |
| Aşağı Yukarı | AY | 0 |
| Biraz Üstünde | BÜ | +0,2 |
| Üstünde | Ü | +0,4 |

Uzmanlar Tablo 3’teki değerlendirmeleri gerçekleştirmişlerdir. Tablodaki değerlendirmeler kısaltma şeklinde verilmiştir. Değerlendirmeler sözel olarak okunacak olursa örneğin Uzman 1, sıkıştırılmış gaz seçeneğinin güvenliğini “aşırı yüksek biraz altında”, kimyasal hidrojen seçeneğinin güvenliğini ise “aşağı yukarı yüksek” olarak değerlendirmiştir.

Tablo 3. Uzman değerlendirmeleri

| Karar Vericiler | Depolama Seçenekleri | Olumlu Kriterler | | | Olumsuz Kriterler | | |
|---------------------|----------------------|---------------------------|---------------|---------------------------------|-------------------|--------------|------------------------------|
| | | C1P: Depolama Verimliliği | C2P: Güvenlik | C3P: Ekonomik Sürdürülebilirlik | C1N: Fire Oranı | C2N: Tehlike | C3N: Birim Depolama Maliyeti |
| Uzman 1 (w=0,45) | Sıkıştırılmış Gaz | (Y; A) | (O; AY) | (Y; BA) | (AD; Ü) | (D; BÜ) | (D; AY) |
| | Metal Hidrit | (D; BÜ) | (AY; BA) | (Y; BÜ) | (O; AY) | (AD; AY) | (AD; BÜ) |
| | Kimyasal Hidrojen | (D; Ü) | (Y; AY) | (O; BÜ) | (D; BA) | (D; A) | (O; A) |
| Uzman 2 (w=0,35) | Sıkıştırılmış Gaz | (Y; AY) | (O; BÜ) | (Y; AY) | (D; BA) | (D; BÜ) | (D; BA) |

| | | | | | | | |
|--------------------|-------------------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | Metal Hidrit | (D; BA) | (Y; BÜ) | (O; Ü) | (O; A) | (AD; BÜ) | (D; BA) |
| | Kimyasal Hidrojen | (D; BA) | (Y; Ü) | (Y; BÜ) | (D; Ü) | (D; A) | (AD; BÜ) |
| Uzman 3 (w=0,2) | Sıkıştırılmış Gaz | (AY; A) | (O; Ü) | (Y; BA) | (AD; BÜ) | (D; AY) | (D; AY) |
| | Metal Hidrit | (D; BA) | (Y; BÜ) | (Y; AY) | (D; BÜ) | (D; A) | (D; A) |
| | Kimyasal Hidrojen | (D; BÜ) | (O; Ü) | (Y; AY) | (D; BA) | (O; A) | (D; BA) |

Bu değerlendirmeler kriter grupları bazında birleştirilerek Tablo 4'teki 2-öğeli tam dilsel sezgisel bulanık değerlendirmeler elde edilmiştir. Uzmanların değerlendirmeleri, karar ağırlıkları dikkate alınarak, Denklem (25)'de verilen toplama operatörü kullanılarak birleştirilerek tablonun alt kısmında yer alan birleştirilmiş değerlendirmeler elde edilmiştir.

Tablo 4. 2-Öğeli Tam Dilsel Sezgisel Birleştirilmiş Değerlendirmeler

| Karar Vericiler | Depolama Seçenekleri | 2-Öğeli Tam Dilsel Sezgisel Değerlendirmeler | | |
|--|----------------------|--|---------------------------------|---|
| | | C1: (Depolama Verimliliği; Fire Oranı) (w=0,3) | C2: (Güvenlik; Tehlike) (w=0,4) | C3: (Ekonomik Sürdürülebilirlik; Birim Depolama Maliyeti) (w=0,3) |
| Uzman 1 (w=0.45) | Sıkıştırılmış Gaz | ((Y; A), (AD; Ü)) | ((O; AY), (D; BÜ)) | ((Y; BA), (D; AY)) |
| | Metal Hidrit | ((D; BÜ), (O; AY)) | ((AY; BA), (AD; AY)) | ((Y; BÜ), (AD; BÜ)) |
| | Kimyasal Hidrojen | ((D; Ü), (D; BA)) | ((Y; AY), (D; A)) | ((O; BÜ), (O; A)) |
| Uzman 2 (w=0.35) | Sıkıştırılmış Gaz | ((Y; AY), (D; BA)) | ((O; BÜ), (D; BÜ)) | ((Y; AY), (D; BA)) |
| | Metal Hidrit | ((D; BA), (O; A)) | ((Y; BÜ), (AD; BÜ)) | ((O; Ü), (D; BA)) |
| | Kimyasal Hidrojen | ((D; BA), (D; Ü)) | ((Y; Ü), (D; A)) | ((Y; BÜ), (AD; BÜ)) |
| Uzman 3 (w=0.2) | Sıkıştırılmış Gaz | ((AY; A), (AD; BÜ)) | ((O; Ü), (D; AY)) | ((Y; BA), (D; AY)) |
| | Metal Hidrit | ((D; BA), (D; BÜ)) | ((Y; BÜ), (D; A)) | ((Y; AY), (D; A)) |
| | Kimyasal Hidrojen | ((D; BÜ), (D; BA)) | ((O; Ü), (O; A)) | ((Y; AY), (D; BA)) |
| Birleştirilmiş Değerlendirme (Dilsel) | Sıkıştırılmış Gaz | ((Y; AY), (D; A)) | ((O; BÜ), (D; BÜ)) | ((Y; BA), (D; AY)) |
| | Metal Hidrit | ((D; AY), (O; BA)) | ((Y; Ü), (AD; BÜ)) | ((Y; BA), (AD; Ü)) |
| | Kimyasal Hidrojen | ((D; BÜ), (D; AY)) | ((Y; AY), (D; BA)) | ((Y; BA), (D; AY)) |
| Birleştirilmiş Değerlendirme ($\beta; \delta$) | Sıkıştırılmış Gaz | (2,94; 0,5) | (2,15; 1,16) | (2,87; 0,93) |
| | Metal Hidrit | (0,98; 1,7) | (3,47; 0,19) | (2,88; 0,49) |
| | Kimyasal Hidrojen | (1,15; 1,01) | (3,02; 0,8) | (2,71; 0,95) |

Devam eden işlemlerin ($\beta; \delta$) sayısal değerleri kullanılarak yapılması daha doğru bir yaklaşımdır. Aksi halde Denklem (43)'teki yuvarlama işlemleri sebebiyle veri kaybı yaşanmaktadır. Bu sebeple geri kalan birleştirme işlemleri sayısal değerler üzerinden yapılmış ve Tablo 5'teki sonuçlar elde edilmiştir. Nitekim, bu örnekte birleştirme işlemleri tekrar dilsel değerlere dönülerek yapılırsa Sıkıştırılmış Gaz ve Metal Hidrit alternatiflerine ilişkin birleştirilmiş dilsel ifadeler birbiriyle aynı elde edileceği için sıralama yapılamayacaktır.

Tablo 5. Birleştirilmiş Sayısal Değerlendirmeler

| | Depolama Seçenekleri | Birleştirilmiş Kriterler (b;g) | Skor Değeri | Doğruluk Değeri |
|---|----------------------|--------------------------------|-------------|-----------------|
| Birleştirilmiş Değerlendirmeler ($\beta; \delta$) | Sıkıştırılmış Gaz | (2.603; 0.893) | 1,71 | 3,496 |
| | Metal Hidrit | (2.546; 0.733) | 1,813 | 3,279 |
| | Kimyasal Hidrojen | (2.366; 0.908) | 1,458 | 3,274 |

Elde edilen Skor ve Doğruluk değerleri kullanılarak Tanım 22 yardımıyla alternatifler şu şekilde sıralanır: Metal Hidrit > Sıkıştırılmış Gaz > Kimyasal Hidrojen. Buradan hareketle, belirlenen kriterlere ve kriter ağırlıklarına göre değerlendirildiğinde Metal Hidrit en iyi alternatif olarak belirlenir. Gümüş vd. [27] tarafından yapılan çalışmada farklı ölçüt grupları ve daha sistematik bir karar verme yaklaşımı kullanılmasına karşın her iki çalışmada da Metal Hidrit en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Fakat 2. ve 3. alternatiflerin sıralaması farklı elde edilmiştir.

Önerilen yöntem, görece küçük bir dilsel terim kümesi kullanılmasına karşın hassas sonuçlar elde etmeye olanak sağlamıştır. Uzman değerlendirmelerinde eksik bilgi durumu söz konusu olduğu için %81 ile %87 (3,496/4 ile 3,274/4) arasında doğruluk derecesine sahip sonuçlar elde edilmiştir. Metal Hidrit, ikinci alternatiften %6, üçüncü alternatiften %24 daha büyük skor değerine sahiptir. Her ne kadar alternatiflerin doğruluk dereceleri birbirine yakın olsa da doğruluk derecesi en yüksek alternatif Sıkıştırılmış Gaz olarak karşımıza çıkmaktadır. Eksik bilgi durumundan kaynaklı veri kaybı (o kısmın da benzer bir üyelik/üye olmama dağılımına sahip olduğu varsayımı ile) normalizasyon yöntemiyle giderilirse, Metal Hidrit yönteminin skor değeri ikinci alternatifin skorundan %11,54 daha büyük hale gelir. Eksik bilgi durumundan kaynaklı veri kaybı hiçbir oranlama yapılmaksızın tamamen üyelik veya tamamen üye olmama durumları gibi ele alınarak limit değerler bulunduğu, $S_{sıkıştırılmış\ gaz} \in [1,206; 2,214]$, $S_{metal\ hidrit} \in [1,092; 2,534]$, $S_{kimyasal\ hidrojen} \in [0,732; 2,184]$ değerleri elde edilir. Aralıkların hepsinin birbirleriyle çakışmasının yanı sıra, Metal Hidrit seçeneğinin skor değerinin alt limiti, Sıkıştırılmış Gaz alternatifinin skor değerinin alt limit değerinden küçük kalmaktadır. Buradan hareketle, eksik bilgi durumuna sebep olan faktörlerin giderilmesi durumunda en iyi alternatifin değişebileceği sonucuna varılabilir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

DBM'nin doğruluk konusunda bir dezavantajı vardır, çünkü BK'lerin DT'lere doğrudan bağımlılığı, modellemenin hassasiyetine zarar verir ve bilgi kaybına neden olur. 2-öğeli DBM'de dilsel bilgi, ara değerlendirmeler yapmak için DT'lerin karşılık gelen BK'lerini tanım ölçeği arasında kaydırma yeteneği verilerek neredeyse sürekli bir yapı olarak modellenmiştir. Avantajlarına rağmen, 2-öğeli DBM, sayısal BF'ye sahip olması nedeniyle “kelimelerle hesaplama” yaklaşımını kısmen ihlal eder.

Bu çalışmada, dilsel BF'ye sahip 2-öğeli tam DBM önerilmiştir. Kavram, temel özellikleri ile inşa edilmiş ve sıradan 2-öğeli DBM'lerle arasındaki dönüşüm tanımlanmıştır. Gerçek hayat problemlerinde karşılaşılan, belirsizlik hakkında bilgi yetersizliği durumunu da kapsayan bir modelleme çerçevesi oluşturabilmek için 2-öğeli tam DSBM yaklaşımı da geliştirilmiş ve karar verme problemlerinde kullanılabilmesi için gerekli olan toplama operatörleri ve sıralama ölçütleri de formüle edilmiştir. Önerilen yapı enerji sektöründeki örnek bir ÇKKV probleminin çözümü için kullanılmış ve duyarlılık analizi yapmaya elverişli, hassas sonuçlar elde edilmiştir. Yöntem, görece küçük dilsel terim kümeleri kullanarak yüksek yorumlanabilirliğe ve doğruluğa sahip, tamamen dilsel ifadelerden oluşan modellemeler yapmaya olanak sağlamaktadır. Gerçek hayat problemlerinde karşılan eksik bilgi durumunu da kapsadığı için farklı türlerde problemlerinin modellenmesi için kullanılabilir. Gelecek çalışma olarak, önerilen yaklaşım bağlam bağımsız dilbilgisi yaklaşımı ile entegre edilebilir. Ayrıca, tutarsız veri durumunu da kapsamak adına Pisagor bulanık kümeler için genişletilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, (8)3, 338-353.
- [2] Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3), 199-249.
- [3] Casillas, J., Cordon, O., Herrera F., Magdalena, L. (2013). Accuracy improvements to find the balance interpretability-accuracy in linguistic fuzzy modeling: an overview. in *Accuracy Improvements in Linguistic Fuzzy Modeling*, Springer, 3-24.
- [4] Cordón, O., Herrera F., Zwir, I. (2002). Linguistic modeling by hierarchical systems of linguistic rules. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10(1), 2-20.
- [5] Xu, Z. (2004). A method based on linguistic aggregation operators for group decision making under linguistic preference relations. *Information Sciences*, 166(1-4), 19-30.
- [6] Herrera, F., Herrera-Viedma, E., Martínez, L. (2008). A fuzzy linguistic methodology to deal with unbalanced linguistic term sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 16(2), 354-370.
- [7] Delgado, M., Herrera, F., Herrera-Viedma, E., Martinez, L. (1998). Combining numerical and linguistic information in group decision making. *Information Sciences*, 107(1-4), 177-194.
- [8] Herrera, F., Martínez, L. (2000). A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 6(8), 746-752.
- [9] Herrera, F., Martinez, L. (2001). The 2-tuple linguistic computational model: advantages of its linguistic description, accuracy and consistency. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 9(1), 33-48.
- [10] Martínez, L., Herrera, F. (2012). An overview on the 2-tuple linguistic model for computing with words in decision making: extensions, applications and challenges. *Information Sciences*, 207, 1-18.
- [11] Herrera, F., Herrera-Viedma, E., Martínez, L. (2000). A fusion approach for managing multi-granularity linguistic terms sets in decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 114(1), 43-58.
- [12] Herrera, F., Martínez, L. (2001). A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 31(2), 227-234.
- [13] Estrella, F. J., Espinilla, M., Herrera, F., Martínez, L. (2014). Flintstones: a fuzzy linguistic decision tools enhancement suite based on the 2-tuple linguistic model and extensions. *Information Sciences*, 280, 152-170.
- [14] Xu, Y., Wang, H. (2011). Approaches based on 2-tuple linguistic power aggregation operators for multiple attribute group decision making under linguistic environment. *Applied Soft Computing*, 11(5), 3988-3997.
- [15] Merigó, J. M., Gil-Lafuente, A. M. (2013). Induced 2-tuple linguistic generalized aggregation operators and their application in decision-making. *Information Sciences*, 236, 1-16.
- [16] Wang, J. H., Hao, J. (2006). A new version of 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14(3), 435-445.
- [17] Dong, Y., Xu, Y., Yu, S. (2009). Computing the numerical scale of the linguistic term set for the 2-tuple fuzzy linguistic representation model. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17(6), 1366-1378.
- [18] Dong, Y., Herrera-Viedma, E. (2014). Consistency-driven automatic methodology to set interval numerical scales of 2-tuple linguistic term sets and its use in the linguistic gdm with preference relation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 45(4), 780-792.
- [19] Beg, I., Rashid, T. (2016). An intuitionistic 2-tuple linguistic information model and aggregation operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 31(6), 569-592.
- [20] Wei, G., Lu, M., Alsaadi, F. E., Hayat, T., Alsaedi, A. (2017). Pythagorean 2-tuple linguistic aggregation operators in multiple attribute decision making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(2), 1129-1142.
- [21] Wei, G., Alsaadi, F. E., Hayat, T., Alsaedi, A. (2018). Picture 2-tuple linguistic aggregation operators in multiple attribute decision making. *Soft Computing*, 22(3), 989-1002.

- [22] Lu, M., Wei, G., Alsaadi, F. E., Hayat, T., Alsaedi, A. (2017). Bipolar 2-tuple linguistic aggregation operators in multiple attribute decision making. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 33(2), 1197-1207.
- [23] De Cock, M., Kerre, E. E. (2004). Fuzzy modifiers based on fuzzy relations. *Information Sciences*, 160(1-4), 173-199.
- [24] Truck, I., Akdag, H. (2009). A tool for aggregation with words. *Information Sciences*, 179(14), 2317-2324.
- [25] Atanassov, K. T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 87-96.
- [26] Xu, Z. (2007). Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6), 1179-1187.
- [27] Gümüş, A. T., Yayla, A. Y., Çelik, E., Yıldız, A. (2013). A combined fuzzy-ahp and fuzzy-gra methodology for hydrogen energy storage method selection in Turkey. *Energies*, 6(6), 3017-3032.



Interval Valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging Operator Based On Multi-Criteria Decision Making Problems

Şerif ÖZLÜ

Nizip Vocational High School of Gaziantep University, Marketing and Advertising Department, 27700, NIZIP/GAZİANTEP

Article Info

Research article

Received: 01.02.2022

Revision: 29.04.2022

Accepted: 19.05.2022

Keywords

Interval valued bipolar fuzzy sets,
Dombi operators,
Decision making

Abstract

In this paper, we develop to a new operator which Interval Valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging operator (IVBFPWDA) by using together IVBFS and Dombi operators. This construction is important because of presenting prioritized flexible approach. The soft concept provides to rank into its own structure. Thus, the obtained rankings act to find to ideal alternative and non-ideal alternative for many k values. Then, the some properties of this concept are introduced like addition, scalar multiplication, scalar power, multiplication. Moreover, we present to score function over (IVBFSs) [8] for ranking of aggregated values. Also, the offered operator is applied over an investment example under the Multi Criteria Decision Making (MCDM) method with five steps. Firstly, the components of Decision Making Matrix are turned into aggregated values thanks to IVBFPWDA and score values are calculated. The obtained values are ranked and determined the most desired alternative. The results show that our operator is reality, objective and agreement in its own. Also, a comparative analysis is proposed by using Hamacher operators over Interval Valued Bipolar fuzzy sets (IVBFSs) [8]. As can be seen from comparison analysis, the results are agreement. But our defined operator has several advantages than operators over IVBFS for example; our operator is flexible and variable. Thus; prefer, need and requirement of decision makers can be satisfied.

1. INTRODUCTION

Fuzzy set concept [1] was proposed in 1965 and developed by novel authors under different disciplines like medical diagnosis, MCDM problems, algebraic constructions, artificial intelligence etc. Especially, MCDM problems have been used many times with fuzzy sets, see [2,3,4] but this cluster has not satisfied enough requirement due to some reasons like increasing of noise information, non-objective interpretations of decision makers, density data flowing so on. Therefore, new concepts were started to be discussed that can be ordered as follow; Type-2 fuzzy sets [5], Bipolar Valued fuzzy sets [6, 7], Interval Valued Bipolar fuzzy sets [8] etc.. One of the most important structures is interval valued bipolar fuzzy sets. The concept was developed to eliminate the biggest obstacle of decision makers like giving only membership value. The decision makers have easily overcome indeterminate information by utilizing two membership instead a membership value together with interval valued bipolar fuzzy concept. An interval valued bipolar fuzzy set is proposed by two fuzzy membership functions as the membership degree of which is a fuzzy set pair in interval $[0,1] \times [0,1]$ and $[-1,0] \times [-1,0]$ instead using a value in $[0,1]$ and $[-1,0]$.

In daily life, human and environment want opposite opinion as white-black, front-back, positive-negative etc.. Therefore, mathematical environment needs to opposite ideas especially into decision making problems. In here, positive and negative values explain to positive or negative ideas of experts about an element. Therefore, bipolarity is very essential for mathematic. In this direction, Lee [9] and Zhang [6, 7] have put forward to idea of bipolar fuzzy set. Bipolarity construction is surveyed with three type. First of all, it is obtained by dividing membership value such as interval valued fuzzy sets (IVFS), Interval valued hesitant fuzzy sets (IVHFS), second type contains to have two different positive values that one of values shows degree of belonging of an element, if second of values, presents degree of non-belonging of an element for example; Intuitionistic fuzzy sets, Intuitionistic hesitant fuzzy sets, Dual hesitant fuzzy sets. If third type, bipolar-valued fuzzy set (BVFS) has been offered by Zhang and Lee [9, 6, 7]. Zhang and Lee

defined two different memberships for an element as positive and negative. Increasing or decreasing of positive value and negative value indicates that increasing or decreasing of positive and negative comments of decision makers about an element.

T-norm and T-conorm constructions of Dombi operators were defined into [10]. But these operators propose more flexible approach according to other operators because of having generalization structure. In short time, a lot of concepts have been defined together with this construction. Picture fuzzy Dombi aggregation operators were presented by Jana et al. [11], then He [12] proposed Dombi hesitant fuzzy information aggregation operators and applied over medical diagnosis, Akram and Khan [13] proposed to Complex Pythagorean Dombi fuzzy graphs, Pythagorean Dombi fuzzy aggregation operators were surveyed by Akram and coauthors [14], Liu et al. [15] presented some intuitionistic fuzzy Dombi Bonferroni mean operators and tested an application over MCDM problems, Chen and Ye [16] defined to Dombi operations over single-valued neutrosophic set and consisted of series of aggregation operators, Complex Pythagorean Dombi fuzzy operators based on aggregation operators were tested by Akram et al. [17], Jana and others [18] offered to Bipolar fuzzy Dombi aggregation operators and Shi [20] defined to Dombi aggregation operators of neutrosophic cubic sets for multiple attribute decision- making.

The prioritized approach was developed over aggregation operators by Yager [21] in 2007. This approach provides prioritization relationship for criteria over aggregation problems. In this approach, while weights of criteria are determined, the weights are calculated based on criteria and the highest weight of criterion is prioritized from weights of other criteria. Thus, the revealed weights of criteria associated with decision makers can be protected from non-objective comments. This statement induces to error margin while the best alternative and the worst alternative are determined. In next time, this construction has been started to be worked by several authors as follow; Jana and others [19] offered Bipolar fuzzy Dombi prioritized aggregation operators in 2020, Gao et al. [22] defined to dual hesitant bipolar fuzzy Hamacher prioritized aggregation operators over MCDM, He and coauthors [23] defined to scaled prioritized geometric aggregation operators, Jin et al. [24] developed Interval valued hesitant fuzzy Einstein prioritized aggregation operators, Ye [25] defined prioritized aggregation operators over trapezoidal fuzzy sets, Akram et al. [26] proposed complex spherical fuzzy prioritized weighted aggregation operators, Liu and coauthors [27] gave extensions of prioritized aggregation operators over complex q-rung orthopair fuzzy information, Akram et al. [28] revealed prioritized weighted aggregation operators under complex pythagorean fuzzy sets. Although above proposed works; fuzzy, complexity, vagueness information has not be removed because of density data channels, non-objective decisions of experts, increasing relationship of disciplines so on. In this paper, we define to Interval valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging operator (IVBFPWDA). This concept has novel advantages as follow;

1. The flexible structure has been revealed and thus comparative analysis has been presented in its own,
2. The positive and negative opinions have been given together with Dombi operators,
3. An application has been proposed over a reality example and the results are completely consistent in its own,
4. A comparative analysis has been developed with Hamacher operators and no change has been observed between the results. The results show that our operator is reality, objective and soft.

The remaining of paper is organized as follow; in section 2, some basic definitions are given as dombi operators so on, in section 3, 4, Interval valued bipolar fuzzy sets (IVBFS) and basic dombi properties are presented and also we offer Interval valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging operator (IVBFPWDA) and Characteristic properties of this operator are presented, in section 5, we give decision making algorithm and an example in daily life and in section 6, we develop a comparative analysis.

2. PRELIMINARY

In this section, we recall some basic notions of fuzzy sets, dombi operators.

Definition 2.1 [1] Let E be a universe. A fuzzy set X over E is a mapping defined as follows:

$$X = \{(\mu_X(x)/x) : x \in E\}$$

where $\mu_X: E \rightarrow [0,1]$.

Here, μ_X called membership function of X , and the value $\mu_X(x)$ is called the grade of membership of $x \in E$. The value represents the degree of x belonging to the fuzzy set X .

Definition 2.2 [5] Let X be a non-empty set. Then, a interval fuzzy set (shortly IFS) in X is in terms of a function that when applied to X return a subset of $[0,1] \times [0,1]$. We express the IFS by

$$\hat{A} = \{(x, \hat{h}_A(x)) : x \in X\},$$

where $\hat{h}_A(x)$ consist of from pairs in $[0,1] \times [0,1]$, denoting the interval membership degree of the element $x \in X$ to the set \hat{A} , $\hat{h} = \hat{h}_A(x)$ is called a interval fuzzy element (IFE).

Definition 2.3 [10] Dombi t -norm and t -conorm are defined, respectively where $k \geq 1$ and $x, y \in [0,1]$ as follow;

- $D(x, y) = \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{1-x}{x} \right)^k + \left(\frac{1-y}{y} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}$
- $D^*(x, y) = 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{x}{1-x} \right)^k + \left(\frac{y}{1-y} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}$

3. INTERVAL VALUED BIPOLAR FUZZY SETS

The concept of IVBFSs was defined by Gao and coauthors [8] in 2019. In this section, the concept of IVBFSs is combined with Dombi operators.

Definition 3.1 [8] Let X be a reference set. An Interval Valued Bipolar fuzzy set \hat{A} is defined as follows:

$$\hat{A} = \{(x, \hat{h}_{\hat{A}_p}(x), \hat{h}_{\hat{A}_n}(x)) : x \in X\},$$

where $\hat{h}_{\hat{A}_p}(x): X \mapsto [0,1] \times [0,1]$ and $\hat{h}_{\hat{A}_n}(x): X \mapsto [-1,0] \times [-1,0]$ are interval fuzzy sets. Moreover, $\hat{A} = \{(x, [\mu_{\hat{A}_p}(x), \nu_{\hat{A}_p}(x)], [\mu_{\hat{A}_n}(x), \nu_{\hat{A}_n}(x)]) : x \in X\}$ is indicated. Also, $\hat{h}_{\hat{A}_p}(x)$ and $\hat{h}_{\hat{A}_n}(x)$ are set of values $[0,1] \times [0,1]$ and $[-1,0] \times [-1,0]$, respectively and $\hat{h} = (\hat{h}_{\hat{A}_p}(x), \hat{h}_{\hat{A}_n}(x))$ is called an Interval Valued Bipolar fuzzy element. In special cases, if $\hat{h}_{\hat{A}_p}(x) \neq \emptyset$ and $\hat{h}_{\hat{A}_n}(x) = \emptyset$, IVBFS is called as interval fuzzy sets and ideal element $\{[1,1], [0,0]\}$ and if non-ideal element, $\{[0,0], [-1, -1]\}$.

Definition 3.2 $A = \{(x, [\mu_{A_p}(x), \nu_{A_p}(x)], [\mu_{A_n}(x), \nu_{A_n}(x)]) : x \in X\}$ and

$B = \{(x, [\mu_{B_p}(x), \nu_{B_p}(x)], [\mu_{B_n}(x), \nu_{B_n}(x)]) : x \in X\}$ be two IVBFSs where $k > 0$. The basic Dombi operations of IVBFEs are proposed with (1), (2), (3) and (4) equations as follows:

$$A \oplus B = \left\{ \left[\begin{array}{l} \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\check{\mu}_{A_p}}{1 - \check{\mu}_{A_p}} \right)^k + \left(\frac{\check{\nu}_{B_p}}{1 - \check{\nu}_{B_p}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\check{\nu}_{A_p}}{1 - \check{\nu}_{A_p}} \right)^k + \left(\frac{\check{\mu}_{B_p}}{1 - \check{\mu}_{B_p}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \\ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_n}}{|\check{\mu}_{A_n}|} \right)^k + \left(\frac{1 + \check{\mu}_{B_n}}{|\check{\mu}_{B_n}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_n}}{|\check{\nu}_{A_n}|} \right)^k + \left(\frac{1 + \check{\nu}_{B_n}}{|\check{\nu}_{B_n}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$A \otimes B =$$

$$\left(\left[\begin{array}{c} \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 - \mu_{Ap}}{\mu_{Ap}} \right)^k + \left(\frac{1 - \mu_{Bp}}{\mu_{Bp}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 - \nu_{Ap}}{\nu_{Ap}} \right)^k + \left(\frac{1 - \nu_{Bp}}{\nu_{Bp}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ -1 + \frac{1}{\left\{ \left(\frac{\mu_{An}}{1 + |\mu_{An}|} \right)^k + \left(\frac{\mu_{Bn}}{1 + |\mu_{Bn}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, -1 + \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\nu_{An}}{1 + |\nu_{An}|} \right)^k + \left(\frac{\nu_{Bn}}{1 + |\nu_{Bn}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \right) \quad (2)$$

$$A^\lambda =$$

$$\left(\left[\begin{array}{c} \frac{1}{1 + \left\{ \lambda \left(\frac{1 - \mu_{Ap}}{\mu_{Ap}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{1}{1 + \left\{ \lambda \left(\frac{1 - \nu_{Ap}}{\nu_{Ap}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ -1 + \frac{1}{\left\{ \lambda \left(\frac{\mu_{An_1}}{1 + |\mu_{An_1}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, -1 + \frac{1}{1 + \left\{ \lambda \left(\frac{\nu_{An_1}}{1 + |\nu_{An_1}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \right) \quad (3)$$

$$\lambda A =$$

$$\left(\left[\begin{array}{c} \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 - \mu_{Ap}}{\mu_{Ap}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{1}{1 + \left\{ \lambda \left(\frac{1 - \nu_{Ap}}{\nu_{Ap}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ \frac{-1}{1 + \left\{ \left(\frac{1 + \mu_{An}}{|\mu_{An}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \lambda \left(\frac{1 + \nu_{An}}{|\nu_{An}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \right) \quad (4)$$

Definition 3.3 [8] Let determine a IVBFS that $A = \{(x, [\mu_{Ap}, \nu_{Ap}], [\mu_{An}, \nu_{An}])\}$, score function and accuracy function are proposed by using following (5) and (6) equations, respectively;

$$s(h) = \frac{1}{4}(1 + \mu_{Ap} + \mu_{An}) + \frac{1}{4}(1 + \nu_{Ap} + \nu_{An}) \quad (5)$$

and

$$a(h) = \frac{1}{4}(\mu_{Ap} - \nu_{Ap}) + \frac{1}{4}(\mu_{An} - \nu_{An}) \quad (6)$$

Definition 3.4 Let determine collection of IVBFe that $A_\rho = \{(x, \{(\check{\mu}_{A_{p\rho}}(x), \check{\nu}_{A_{p\rho}}(x))\}, \{(\check{\mu}_{A_{n\rho}}(x), \check{\nu}_{A_{n\rho}}(x))\}): x \in X\}$;

IVBFPWDA: $\Phi^\omega \rightarrow \Phi$ is a mapping called as Interval Valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging operator for $k > 0$ and is defined with equation (7) as below;

$$\begin{aligned}
 IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_\varpi) &= \bigoplus_{\ell=1}^{\varpi} \left(\frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} (A_\ell) \right) = \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_1 \oplus \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_2 \oplus \dots \oplus \\
 \frac{T_\varpi}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_\varpi &= \left[\begin{array}{c} \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\mu}_{Ap_\ell}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\nu}_{Ap_\ell}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \\ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_\ell}}{|\check{\mu}_{An_\ell}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_\ell}}{|\check{\nu}_{An_\ell}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \end{array} \right] \quad (7)
 \end{aligned}$$

where $T_\ell = \prod_{\ell=1}^{\varpi-1} s(A_\ell)$ and $(\ell = 2, 3, \dots, \varpi)$, $T_1 = 1$ and $s(A_\ell)$ indicates to score values of A_ℓ .

4. CHARACTERISTIC OF IVBFPWDA OPERATOR

Theorem 4.1 Let determine collection of IVBF e that $A_\ell = \{(x, \{\check{\mu}_{Ap_\ell}(x), \check{\nu}_{Ap_\ell}(x)\}), \{\check{\mu}_{An_\ell}(x), \check{\nu}_{An_\ell}(x)\}) : x \in X\}$ with equation 7;

$$\begin{aligned}
 IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_\varpi) &= \bigoplus_{\ell=1}^{\varpi} \left(\frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} (A_\ell) \right) = \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_1 \oplus \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_2 \oplus \dots \oplus \frac{T_\varpi}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_\varpi \\
 &= \left[\begin{array}{c} \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\mu}_{Ap_\ell}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\nu}_{Ap_\ell}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \\ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_\ell}}{|\check{\mu}_{An_\ell}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_\ell}}{|\check{\nu}_{An_\ell}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

where $T_\ell = \prod_{\ell=1}^{\varpi-1} s(A_\ell)$ and $(\ell = 2, 3, \dots, \varpi)$, $T_1 = 1$ and $s(A_\ell)$ indicates to score values of A_ℓ .

Proof. Let use mathematical induction on ϖ and look for $\varpi = 2$;

$$\frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_1 = \left[\begin{array}{c} \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_1}}{1 - \check{\mu}_{Ap_1}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_1}}{1 - \check{\nu}_{Ap_1}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \\ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_1}}{|\check{\mu}_{An_1}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_1}}{|\check{\nu}_{An_1}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \end{array} \right]$$

and

$$\frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} A_2 = \left[\begin{array}{c} \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_2}}{1 - \check{\mu}_{Ap_2}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_2}}{1 - \check{\nu}_{Ap_2}} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \\ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_2}}{|\check{\mu}_{An_2}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_2}}{|\check{\nu}_{An_2}|} \right)^k + \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \end{array} \right]$$

and from here

$$\frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} A_1 \oplus \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} A_2 = \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_1}}{1 - \check{\mu}_{Ap_1}} \right)^k + \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_2}}{1 - \check{\mu}_{Ap_2}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_1}}{1 - \check{\nu}_{Ap_1}} \right)^k + \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_2}}{1 - \check{\nu}_{Ap_2}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ -1 \\ 1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_1}}{|\check{\mu}_{An_1}|} \right)^k + \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_2}}{|\check{\mu}_{An_2}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}, \\ -1 \\ 1 + \left\{ \frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_1}}{|\check{\nu}_{An_1}|} \right)^k + \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_2}}{|\check{\nu}_{An_2}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right]$$

$$\frac{T_1}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} A_1 \oplus \frac{T_2}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} A_2 = \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^2 \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_{\ell}}}{1 - \check{\mu}_{Ap_{\ell}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^2 \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_{\ell}}}{1 - \check{\nu}_{Ap_{\ell}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^2 \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_{\ell}}}{|\check{\mu}_{An_{\ell}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}, 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^2 \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_{\ell}}}{|\check{\nu}_{An_{\ell}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right]$$

from here for $\varpi = \zeta$, IVBFPWDA holds as follow;

$$IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_{\zeta}) = \bigoplus_{\ell=1}^{\zeta} \left(\frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} (A_{\ell}) \right)$$

$$= \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_{\ell}}}{1 - \check{\mu}_{Ap_{\ell}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_{\ell}}}{1 - \check{\nu}_{Ap_{\ell}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_{\ell}}}{|\check{\mu}_{An_{\ell}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}, 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_{\ell}}}{|\check{\nu}_{An_{\ell}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right]$$

and for $\varpi = \zeta + 1$;

$$\begin{aligned} \bigoplus_{\ell=1}^{\zeta+1} \left(\frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} (A_\ell) \right) &= \bigoplus_{\ell=1}^{\zeta} \left(\frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} (A_\ell) \right) \oplus \frac{T_{\zeta+1}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} (A_{\zeta+1}) = \\ &\left(\left[\begin{array}{c} 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\mu}_{Ap_\ell}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\nu}_{Ap_\ell}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \oplus \left[\begin{array}{c} -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_\ell}}{|\check{\mu}_{An_\ell}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_\ell}}{|\check{\nu}_{An_\ell}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right] \right) \\ &\left(\left[\begin{array}{c} 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_{\zeta+1}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_{\zeta+1}}}{1 - \check{\mu}_{Ap_{\zeta+1}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \frac{T_{\zeta+1}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_{\zeta+1}}}{1 - \check{\nu}_{Ap_{\zeta+1}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \oplus \left[\begin{array}{c} -1 \\ 1 + \left\{ \frac{T_{\zeta+1}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_{\zeta+1}}}{|\check{\mu}_{An_{\zeta+1}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \frac{T_{\zeta+1}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_{\zeta+1}}}{|\check{\nu}_{An_{\zeta+1}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right] \right) \end{aligned}$$

Thus

$$\bigoplus_{\ell=1}^{\zeta+1} \left(\frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} (A_\ell) \right) = \left(\left[\begin{array}{c} 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta+1} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\mu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\mu}_{Ap_\ell}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta+1} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{\check{\nu}_{Ap_\ell}}{1 - \check{\nu}_{Ap_\ell}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right] \oplus \left[\begin{array}{c} -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta+1} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{An_\ell}}{|\check{\mu}_{An_\ell}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\zeta+1} \frac{T_\ell}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_\ell} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{An_\ell}}{|\check{\nu}_{An_\ell}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right] \right)$$

it holds for $\ell = \zeta + 1$ so it provides for all ℓ .

Theorem 4.2 (idempotency) Let propose collection of IVBFe that

$A_\ell = \{(x, \{\check{\mu}_{Ap_\ell}(x), \check{\nu}_{Ap_\ell}(x)\}), \{\check{\mu}_{An_\ell}(x), \check{\nu}_{An_\ell}(x)\}) : x \in X\}$. Let be $A_\ell = A$ for $(\ell = 1, 2, \dots, \overline{\omega})$. Thus, $IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_\ell) = A$ where $T_\ell = \prod_{\ell=1}^{\overline{\omega}-1} s(A_\ell)$ and $(\ell = 2, 3, \dots, \overline{\omega})$, $T_1 = 1$ and $s(A_\ell)$ indicates to score values of A_ℓ .

Proof. Firstly let write IVBFPWDA operator;

$$\begin{aligned}
 IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_{\varpi}) &= \bigoplus_{\ell=1}^{\varpi} \left(\frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} (A_{\ell}) \right) = \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right] \\
 &= \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}, 1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \end{array} \right] \\
 &= \left[\begin{array}{c} 1 \\ 1 + \left\{ \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right) \right\} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right) \right\} \\ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right) \right\}} \\ -1 \\ 1 + \left\{ \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right) \right\} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

Thus, $IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_{\varpi}) = A$.

Theorem 4.3 (monotonicity) *Let determine two IVBFSs that*

$$A_{\ell} = \{(x, \{[\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}(x), \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}(x)]\}, \{(\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}(x), \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}(x))\}) : x \in X\} \text{ and}$$

$$A_{\ell}^* = \{(x, \{[\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}(x), \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}^*}(x)]\}, \{[\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}(x), \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}^*}(x)]\}) : x \in X\} \ (\ell = 1, 2, \dots, \varpi),$$

$$IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_{\varpi}) \leq IVBFPWDA(A_1^*, A_2^*, \dots, A_{\varpi}^*).$$

Proof. We know that $A_{\ell} \leq A_{\ell}^*$, in this statement for first part of equation 7;

$$\begin{aligned}
 &\Leftrightarrow \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \leq \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \\
 &\Leftrightarrow 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \leq 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}
 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \geq \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}$$

$$\Leftrightarrow \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \leq \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\}$$

similarly

$$\left\{ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \leq \left\{ 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\}$$

It can be made like above proof and thus;

$$\left[\left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \right]$$

$$\leq \left[\left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\mu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{\check{\nu}_{A_{p_{\ell}}^*}}{1 - \check{\nu}_{A_{p_{\ell}}^*}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right] \right]$$

Also,

$$\Leftrightarrow \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \leq \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k$$

$$\Leftrightarrow 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}} \leq 1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}$$

$$\Leftrightarrow \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \geq \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\check{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\}$$

similarly,

$$\left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\check{\nu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \geq \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\overline{\omega}} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \check{\nu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\check{\nu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\}$$

and from here

$$\geq \left\{ \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}}{|\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}|} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right], \left[\frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}^*}}{|\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}^*}|} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right] \right\}$$

the proof is completed.

Theorem 4.4 (Boundedness) Let determine collection of IVBFSs that

$A_{\ell} = \{(x, \{[\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}(x), \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}(x)]\}, \{[\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}(x), \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}(x)]\}) : x \in X\}$ and A_{ℓ}^+ and A_{ℓ}^- are maximum and minimum elements for $\ell = 1, 2, \dots, \varpi$. Thus, $A^- \leq IVBFPWDA(A_1, A_2, \dots, A_{\varpi}) \leq A^+$.

Proof. In here, it is open by using equation 7 that

$$A^+ = \max\{A_1, A_2, \dots, A_{\ell}\} = (\{[\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+(x), \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+(x)]\}, \{[\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^+(x), \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^+(x)]\}) \text{ and}$$

$$A^- = \min\{A_1, A_2, \dots, A_{\ell}\} = (\{[\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^-(x), \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^-(x)]\}, \{[\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^-(x), \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^-(x)]\}) \text{ where}$$

$$\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+ = \max_{\ell} \{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^- = \min_{\ell} \{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+ = \max_{\ell} \{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^- = \min_{\ell} \{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^+ = \min_{\ell} \{\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^- = \max_{\ell} \{\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^+ = \min_{\ell} \{\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}\}, \quad \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^- = \max_{\ell} \{\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}\}$$

from here

$$\left\{ \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^-}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^-} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^-}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^-} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right], \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right] \right\}$$

$$\leq \left\{ \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right], \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right] \right\}$$

$$\leq \left\{ \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^+} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right], \left[1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^-}{1 - \tilde{\mu}_{A_{p_{\ell}}}^-} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}}, 1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{\tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^-}{1 - \tilde{\nu}_{A_{p_{\ell}}}^-} \right)^k \right)^{\frac{1}{k}}} \right] \right\}$$

similarly;

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^-}{|\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^-|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^-}{|\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^-|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \\ & \leq \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^-}{|\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^-|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^-}{|\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^-|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \\ & \leq \left\{ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^+}{|\tilde{\mu}_{A_{n_{\ell}}}^+|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}, \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{\ell=1}^{\varpi} \frac{T_{\ell}}{\sum_{\ell=1}^{\varpi} T_{\ell}} \left(\frac{1 + \tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^+}{|\tilde{\nu}_{A_{n_{\ell}}}^+|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \right\} \end{aligned}$$

5. AN APPLICATION OF MULTI-ATTRIBUTE DECISION-MAKING METHOD UNDER IVBFS

In this section, we define the proposed IVBFPWDA into an algorithm and apply over a MCDM problem with m alternatives and t criteria to indicate effective of Dombi Aggregation operators over IVBFS. Let $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ be a set of alternatives, in here there is a prioritization relationship between alternatives and is defined as a linear ordering that $A_1 > A_2 > \dots > A_m$ show that A_j has a higher priority than A_i , if $j < i$, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ be a set of criteria and interval valued bipolar fuzzy decision matrix is $B = (\hat{b}_{ij})_{m \times t} = ([\mu_{\hat{b}_{p_{ij}}}, \nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}], [\mu_{\hat{b}_{n_{ij}}}, \nu_{\hat{b}_{n_{ij}}}])_{m \times t}$ for $i = 1, 2, \dots, m$ and $j = 1, 2, \dots, t$. Moreover, $[\mu_{\hat{b}_{p_{ij}}}, \nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}]$ and $[\mu_{\hat{b}_{n_{ij}}}, \nu_{\hat{b}_{n_{ij}}}]$ indicate to positive interval membership value and negative interval membership value to be appointed by decision makers, respectively.

Then, the following steps have been proposed for algorithm.

1. Determine values of T_{ij} where

$$T_{ij} = \prod_{\psi=1}^{j-1} s(\hat{b}_{i\psi}) \tag{8}$$

$$T_{i1} = 1 \tag{9}$$

for $i = 1, 2, \dots, m$ and $j = 1, 2, \dots, t$.

2. Apply to Aggregation operators IVBFPWDA

$$\begin{aligned}
 \hat{b}_i &= \text{IVBFPWDA}(\hat{b}_{i1}, \hat{b}_{i2}, \dots, \hat{b}_{it}) = \bigoplus_{j=1}^t \left(\frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} (\hat{b}_{ij}) \right) \\
 &= \frac{T_{i1}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \hat{b}_{i1} \oplus \frac{T_{i2}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \hat{b}_{i2} \oplus \dots \oplus \frac{T_{it}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \hat{b}_{it} \\
 &= \left[\begin{array}{c} \frac{1}{1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{j=1}^t \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \left(\frac{\mu_{\hat{b}_{p_{ij}}}}{1 - \mu_{\hat{b}_{p_{ij}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}} \\ \frac{1}{1 - \frac{1}{1 + \left\{ \sum_{j=1}^t \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \left(\frac{\nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}}{1 - \nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}}} \\ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{j=1}^t \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \left(\frac{1 + \mu_{\hat{b}_{n_{ij}}}}{|\mu_{\hat{b}_{n_{ij}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \\ \frac{-1}{1 + \left\{ \sum_{j=1}^t \frac{T_{ij}}{\sum_{j=1}^t T_{ij}} \left(\frac{1 + \nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}}{|\nu_{\hat{b}_{p_{ij}}}|} \right)^k \right\}^{\frac{1}{k}}} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

3. Calculate score values according to score function $s(\hat{b}_i)$ to order rank of alternatives for $i = 1, 2, \dots, m$;
4. Obtain rank of alternatives and select the most desirable value;
5. End.

Numerical example

A company thinks to invest over different business sectors so has made some studies together with the experts of subject and thus decision makers have developed five different alternatives based on five criterions as follow; A_1 ; A computer production company, A_2 ; A communication company, A_3 ; A food company, A_4 ; A car company, A_5 ; An airport company; if criterions,

C_1 ; environment impact: This factor is very important for a business because of environmental damage caused by the business. The CEO of business has to minimize the given harm over environmental;

C_2 ; the proximity to raw material: This criterion will reduce to cost by decreasing the need for gasoline and the number of workers so on;

C_3 ; cost: the employer should own the factory with the least cost, so she\he has to choose the most logical alternative;

C_4 ; economic fluctuations: Economic fluctuations within the country are a factor that directly affects the business;

C_5 ; experience: The owner of the business should have a certain background about the business she\he will establish.

Decision makers construct to decision making matrix as follow in Table 1.

Table 1. Evaluations of alternatives made by decision makers

| | | | |
|-------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | C_1 | C_2 | C_3 |
| A_1 | {[0.10,0.30], [-0.40, -0.10]} | {[0.50,0.90], [-0.20, -0.10]} | {[0.40,0.58], [-0.30, -0.20]} |
| A_2 | {[0.50,0.80], [-0.80, -0.60]} | {[0.30,0.50], [-0.60, -0.30]} | {[0.10,0.20], [-0.80, -0.70]} |
| A_3 | {[0.40,0.54], [-0.80, -0.10]} | {[0.10,0.58], [-0.10, -0.01]} | {[0.20,0.30], [-0.50, -0.30]} |
| A_4 | {[0.20,0.21], [-0.50, -0.10]} | {[0.30,0.40], [-0.30, -0.20]} | {[0.30,0.40], [-0.60, -0.50]} |
| A_5 | {[0.30,0.40], [-0.30, -0.20]} | {[0.40,0.50], [-0.10, -0.01]} | {[0.20,0.50], [-0.90, -0.40]} |
| | C_4 | C_5 | |
| | {[0.30,0.80], [-0.80, -0.70]} | {[0.40,0.90], [-0.60, -0.50]} | |
| | {[0.20,0.90], [-0.54, -0.30]} | {[0.50,0.70], [-0.80, -0.50]} | |
| | {[0.50,0.70], [-0.91, -0.90]} | {[0.20,0.50], [-0.70, -0.10]} | |
| | {[0.20,0.30], [-0.90, -0.80]} | {[0.40,0.90], [-0.90, -0.50]} | |
| | {[0.10,0.20], [-0.60, -0.50]} | {[0.70,0.80], [-0.98, -0.50]} | |

Consist of T_{ij} by using to Eqs 8 and 9 as follow;

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0.4750 & 0.3681 & 0.2282 & 0.0912 \\ 1 & 0.4750 & 0.2256 & 0.0451 & 0.0254 \\ 1 & 0.3350 & 0.3276 & 0.1392 & 0.0483 \\ 1 & 0.4525 & 0.2488 & 0.0995 & 0.0199 \\ 1 & 0.5750 & 0.3836 & 0.1342 & 0.0402 \end{pmatrix}$$

Obtain interval valued Bipolar fuzzy elements by utilizing $IVBFPWDA$ operator \hat{b}_i for $i = 1,2,3,4,5$ and $k = 1$ as follow;

$$\begin{aligned} \hat{b}_1 &= IVBFPWDA(\hat{b}_{11}, \hat{b}_{12}, \hat{b}_{13}) = \{(0.3064,0.7622), (-0.3209, -0.1171)\} \\ \hat{b}_2 &= IVBFPWDA(\hat{b}_{21}, \hat{b}_{22}, \hat{b}_{23}) = \{(0.4283,0.7473), (-0.7227, -0.4611)\} \\ \hat{b}_3 &= IVBFPWDA(\hat{b}_{31}, \hat{b}_{32}, \hat{b}_{33}) = \{(0.3409,0.5453), (-0.3125, -0.0349)\} \\ \hat{b}_4 &= IVBFPWDA(\hat{b}_{41}, \hat{b}_{42}, \hat{b}_{43}) = \{(0.2430,0.3498), (-0.4415, -0.1355)\} \\ \hat{b}_5 &= IVBFPWDA(\hat{b}_{51}, \hat{b}_{52}, \hat{b}_{53}) = \{(0.3322,0.4643), (-0.2873, -0.1781)\} \end{aligned}$$

Score values are given for the all cases over $IVBFPWDA$ as follow;

Table 2 . Score Values according to $IVBFPWDA$

| | $s_{(b^*_1)}$ | $s_{(b^*_2)}$ | $s_{(b^*_3)}$ | $s_{(b^*_4)}$ | $s_{(b^*_5)}$ | Ranking Alternatives |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------------------|
| k=1 | 0.6576 | 0.4979 | 0.6346 | 0.5039 | 0.5827 | $A_1 > A_3 > A_5 > A_4 > A_2$ |

| | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| k=2 | 0.6990 | 0.5280 | 0.6767 | 0.5627 | 0.6732 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=3 | 0.7196 | 0.5491 | 0.6924 | 0.6094 | 0.7076 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=4 | 0.7318 | 0.5641 | 0.7015 | 0.6345 | 0.7382 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=5 | 0.7397 | 0.5751 | 0.7083 | 0.6496 | 0.7605 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=6 | 0.7453 | 0.5836 | 0.7141 | 0.6598 | 0.7760 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=7 | 0.7494 | 0.5901 | 0.7193 | 0.6673 | 0.7870 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=8 | 0.7525 | 0.5953 | 0.7239 | 0.6732 | 0.7952 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=9 | 0.7550 | 0.5994 | 0.7281 | 0.6781 | 0.8015 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |
| k=10 | 0.6260 | 0.6028 | 0.7318 | 0.6821 | 0.8064 | A_1>A_3>A_5>A_4>A_2 |

6 . COMPARATIVE ANALYSIS

In this section, we give a comparative analysis. To do this, firstly we utilize some aggregation operators over IVBFSs. Moreover, it should be noted that our proposed operator is to work as agreement with these aggregation operators but has more advantages because of having generalized concept like dombi operators. In here, we calculate for $k = 1,2,3,4,5$ to dombi operators. The results are as following;

Table 3. Ranking alternatives of Score Function Values under IVBFPWDA

| | $s_{\hat{b}_1}$ | $s_{\hat{b}_2}$ | $s_{\hat{b}_3}$ | $s_{\hat{b}_4}$ | $s_{\hat{b}_5}$ | Ranking Alternatives |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| $k = 1$ | 0.6079 | 0.5381 | 0.5789 | 0.3709 | 0.6285 | $A_5 > A_1 > A_3 > A_2 > A_4$ |
| $k = 2$ | 0.6569 | 0.5532 | 0.5891 | 0.4326 | 0.6422 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_2 > A_4$ |
| $k = 3$ | 0.6796 | 0.5632 | 0.5946 | 0.4821 | 0.6531 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| $k = 4$ | 0.6942 | 0.5700 | 0.5987 | 0.5155 | 0.6613 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_4 > A_2$ |

| | | | | | | |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------------------|
| $k = 5$ | 0.7057 | 0.5748 | 0.6022 | 0.5387 | 0.6675 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| IVBFHWA [8] | 0.679 | 0.571 | 0.578 | 0.573 | 0.615 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| IVBFHWG [8] | 0.575 | 0.480 | 0.516 | 0.497 | 0.557 | $A_1 > A_5 > A_3 > A_4 > A_2$ |

7. CONCLUSION

In this paper, we present to IVBFPWDA by using IVBFS together with prioritized approach. The basic goal that while weights of the criteria are determined, the margin of error is minimized by eliminating the non-objective comments of the decision makers and also to make a comparison within itself by obtaining more flexible structure thanks to dombi operators. Then, we apply to defined operator over a realistic example. These results are almost agreement in their own. Moreover, we propose to Table 2 and Table 4 that these tables indicate that our operators are flexible, realistic and useful.

The contributions of paper can be ordered in literature as follow;

1. Interval Valued Bipolar Fuzzy Prioritized Weighted Dombi Averaging operator (IVBFPWDA) has been offered;
2. The decision making algorithm and a problem have been discussed for a operator and the results of presented operator have been compared in their own;
3. A comparative analysis has been made with operators over IVBFS;

Besides, in next time; we plan to combine to these operators with Hamacher aggregation operators, Power aggregation operator.

Compliance with Ethical Standards

Ethical Approval

This article does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors.

Conflicts Of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

REFERENCES

- [1] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets, *Inf. Cont.* 8:338-353.
- [2] Pınar, A. (2021). q-Rung orthopair fuzzy TOPSIS application for 3rd party logistics provider selection. *Journal of Turkish Operations Management* 1(5): 588-597.
- [3] Pınar, A. (2020). Tedarikçi seçiminde kullanılan çok kriterli karar verme metotları. *Journal of Turkish Operations Management*, 4(2): 449-478.
- [4] Pınar, A., & Boran, F. E.. (2021). A novel distance measure on q-rung picture fuzzy sets and its application to decision making and classification problems. *Artificial Intelligence Review*, 1-34.
- [5] Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning.1” *Inf. Sci.* 8:199-249.
- [6] Zhang, W.R (1998). Bipolar fuzzy sets. *Proc Fuzzy IEEE* 1:835-840.
- [7] Zhang, W.R. (1994). Bipolar fuzzy sets and relations: a computational framework for cognitive modeling and multi agent decision analysis. In: *Proceedings of IEEE Conference* 305-309.
- [8] Wei, G.W., Wei, C., Gao, H. (2018). Multiple attribute decision making with interval-valued bipolar fuzzy information and their application to emerging technology commercialization evaluation. *IEEE Access*, 6:60930-60955.
- [9] Lee, K.M. (2000). Bipolar valued fuzzy sets and their operations. In *Proc. Int. Conf. on Intell. Tech.*, Bangkok, Thailand 307-312.
- [10] Dombi, J. (1982). A general class of fuzzy operators, the De Morgan class of fuzzy operators and fuzziness measures induced by fuzzy operators. *Fuzzy Sets Syst.* 8(2):149-163.
- [11] Jana, C., Senapati, T., Pal, M., and Yager, R.R. (2019). Picture fuzzy Dombi aggregation operators: application to MADM process, *App. Soft Comput.* 74:99-109
- [12] He, X. (2018). Typhoon disaster assessment based on Dombi hesitant fuzzy information aggregation operators, *Nat. Haz.*, 90(3): 1153-1175.
- [13] Akram, M., Khan, A. (2020). Complex Pythagorean Dombi fuzzy graphs for decision making. *Gran. Comput.* <https://doi.org/10.1007/s41066-220-00223-5>.
- [14] Akram, M., Dudek, W. A., Dar, J.M. (2019). Pythagorean Dombi fuzzy aggregation operators with application in multi-criteria decision-making. *Inter. Jour. of Intell. Syst.*, 34(11):3000-3019.
- [15] Liu, P., Liu, J., Chen, S.M. (2018). Some intuitionistic fuzzy Dombi Bonferroni mean operators and their application to multi-attribute group decision making. *J. Oper. Res. Soc.* 69(1):1-24.
- [16] Chen, J., Ye, J. (2017). Some single-valued neutrosophic Dombi weighted aggregation operators for multiple attribute decision-making”. *Sym.* 9(6):82.
- [17] Akram, M., Khan, A., Borumand, Saeid A. (2020). Complex Pythagorean Dombi fuzzy operators using aggregation operators and their decision-making, *Exp. Syst.* 1-28.

- [18] Jana, C., Pal, M., Wang, J.Q. (2018). Bipolar fuzzy Dombi aggregation operators and its application in multiple-attribute decision-making process. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 1-17.
- [19] Jana, C., Pal, M., Wang, J.Q. (2020). Bipolar fuzzy Dombi prioritized aggregation operators in multiple attribute decision making. *Soft Comput.* 24(5):3631-3646.
- [20] Shi, L., Ye, J. (2018). Dombi aggregation operators of neutrosophic cubic sets for multiple attribute decision-making. *Alg.* 11(3):1-15.
- [21] Yager, R.R. (2008). Prioritized Aggregation operators. *Int. J. of App. Reason*, 48:263-274.
- [22] Gao, H., Wei, G.W., Huang, Y.H. (2018). Dual hesitant bipolar fuzzy Hamacher prioritized aggregation operators in multiple attribute decision making. *IEEE Access* 6(1):11508-11522.
- [23] He, Y.D., He, Z., Zhou, P.P., Deng, Y.J. (2016). Scaled prioritized geometric aggregation operators and their applications to decision making. *Int. J. Uncert. Fuzz. Knowl. Based Syst.* 24(1):13-46.
- [24] Jin, F.F., Ni, Z.W., Chen, H.Y. (2016). "Interval-valued hesitant fuzzy Einstein prioritized aggregation operators and their applications to multi attribute group decision making". *Soft Comput.* 20(5):1863-1878.
- [25] Ye, J. (2014). Prioritized aggregation operators of trapezoidal intuitionistic fuzzy sets and their application to multicriteria decision making. *Neural Comput. Appl.* 25(6):1447-1454.
- [26] Akram, M., Khan, A., Alcantud, J.C.R., Garcia, G.S. (2021). A Hybrid Decision Making framework under complex spherical fuzzy prioritized weighted aggregation operators, *Exp. Sys.* DOI:101111/exsy.12712.
- [27] Liu, P., Akram, M., Sattar, A. (2020). Extensions of prioritized weighted aggregation operators for decision-making under complex q-rung orthopair fuzzy information, *J. Intell. Fuzzy Syst.* 1-25.
- [28] Akram, M., Peng, X., Al-Kenani, A.N., Sattar, A. (2020). Prioritized weighted aggregation operators under complex pythagorean fuzzy information. *J. Intell. Fuzzy Syst.* 39(3):4763-4783.



Fire Safety Evaluation of Dwellings In the Framework of Regulation

Hüseyin BAŞDEMİR^{1,*}

¹Tokat Gaziosmanpaşa University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, 60150, Taşlıçiftlik/TOKAT

Article Info

Research article
Received: 16.08.2021
Revision: 12.01.2022
Accepted: 24.01.2022

Keywords

Fire Safety,
Housing,
Fire Regulation

Abstract

This research aims to analyze how Turkey's Regulation on Fire Protection influences fire safety precautions on housing design and construction in Turkey. Tokat province center, which is one of the less populated cities of the country, has been chosen as the study area. In the study; 5 residential buildings which were designed and built before 2002 in when Turkey's Regulation on Fire Protection entered into force and also 5 different residential buildings which were designed and built after 2002 have been analyzed comparatively according to 20 measurable criteria which are chosen among the provisions of Turkey's Regulation on Fire Protection (TRFP) and according to the architectural project, the studies done in the building site and interviews carried out with responsible persons. The influence of TRFP on the Protection of Buildings from Fire in the design and construction process of residential buildings constructed in Tokat has been evaluated concerning the results of this analysis. When the results of the analysis are examined, it has been determined that there has been an improvement, in terms of fire safety, in the houses which were designed after the TRFP entered into force but it has not reached the desired level. The housings which are selected in this research are built after the TRFP and they are among the high building group. It is thought that this situation makes it difficult to fulfill the provisions of the TRFP, and therefore several criteria are not fulfilled.

1. INTRODUCTION

Security, which is one of the basic requirements of people, also includes fire safety. Fire is a serious source of danger for buildings all over the world. The fact that fire disasters have caused so many lives and property losses from past to present, shows that the security measures are insufficient. Especially since these precautions are not taken into consideration during the design and planning stages, life and property losses rise increasingly. Applications performed, the technology used, the human-based approaches and solutions have administrative and legal aspects as well as technical aspects to provide fire safety in a building. The risk of fire and the devastating consequences of fire have formed the basis of the precautions taken throughout history. Experiences derived from adverse events that happened in past have determined the starting point of all current international and national legislation and regulations.

Fire safety researches have been carried out throughout history in developed countries. Organizations such as National Fire Protection Association (NFPA) in the United States, International Code Council (ICC) and private laboratories called Underwriters Laboratories (U.L.) have been particularly effective in the enacting of fire-related legislation and regulations.

Common features of regulations in developed countries are prevention of fire, ensuring safe escape from the building, preventing the fire from spreading inside the building, and preventing the fire from

reaching other neighboring buildings. In the regulations in developed countries, there is the provision that requires to take structural precautions at the design stage. These precautions have been supervised by the relevant institutions or authorities.

Until 2002 in Turkey, there was the Regulation of Istanbul Metropolitan Municipality on Protection from Fire and also the Regulation on Protection of Public Buildings from Fire which entered into force in 1994. The first regulation entered into force for all the country is "Turkeys Regulation on Fire Protection (TRFP)" published in Official Gazette dated 26.07.2002 and numbered 24827. This regulation also refers to the fire protection of buildings. However, the TRFP published in 2002 was amended and the new regulation was prepared in 2007 to reduce the problems encountered, to harmonize the regulation with the European legislation, to add provisions related to existing structures, to correct misinterpretations and writing errors, to simplify regulations, to reduce bureaucracy and to add technological developments.

In this study, residential buildings will be analyzed within the framework of TRFP. The reason for residential buildings was selected in a study is; when buildings are classified according to the purpose of use, residential buildings are the most common type of buildings in the world and Turkey and most fires occur in those buildings.

It is seen that residential buildings are the most common type among building stock when the researches related to the number of building in Turkey are examined which is shown in Table1.

Table 1. Completed or partially completed new buildings according to ccupancy permits in Turkey (TurkStat,2021)

| Year | | Total | One dwelling buildings | Two and more dwelling buildings | Non residential buildings |
|------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 2015 | Number of building | 110 204 | 17 436 | 77 100 | 15 668 |
| | Floor area (m ²) | 143 105 650 | 3 648 060 | 105 567 536 | 33 890 054 |
| 2016 | Number of building | 111 383 | 18 764 | 76 683 | 15 936 |
| | Floor area (m ²) | 151 305 780 | 4 031 238 | 111 008 969 | 36 265 573 |
| 2017 | Number of building | 118 802 | 19 944 | 84 178 | 14 680 |
| | Floor area (m ²) | 163 356 035 | 4 405 091 | 123 202 543 | 35 748 401 |
| 2018 | Number of building | 127 117 | 20 728 | 89 435 | 16 954 |
| | Floor area (m ²) | 174 607 255 | 4 577 151 | 132 372 998 | 37 657 106 |
| 2019 | Number of building | 93 882 | 15 403 | 65 583 | 12 896 |
| | Floor area (m ²) | 150 097 152 | 3 408 361 | 114 711 312 | 31 977 479 |
| 2020 | Number of building | 77 721 | 16 582 | 51 225 | 9 914 |
| | Floor area (m ²) | 122 079 251 | 3 369 863 | 94 288 608 | 24 420 780 |
| 2021 | Number of building | 61 183 | 16 366 | 36 979 | 7 838 |
| | Floor area (m ²) | 85 219 370 | 3 203 614 | 62 682 686 | 19 333 070 |

Note: The information for 2019, 2020 and 2021 are temporary. 2021 data are the first nine months.

According to the National Address Database data, as of the end of September 2021, the total number of residences in Turkey (housing, lodging, summer/seasonal residence, concierge, and residential constructions) reached 40.2 million. It is seen that, throughout Turkey, there are 15 million 514 thousand 953 housings, one million 427 thousand 860 private offices, 304 thousand 548 public offices according to 2008 data and that the number of households is 19,481,678 (TurkStat, 2013) according to the 2011 Population and Housing Survey in Turkey. It is also seen that the number of households in Turkey is 21 million 662 thousand 260 according to 2015 Turkish Statistical Institute data. [2]

2. FIRE SAFETY IN RESIDENTIAL BUILDINGS

Fire is one of the scariest dangers for any homeowner, and while the number of house fires in the World has steadily changed in recent years, these incidents still contribute to thousands of deaths and billions of dollars of damage each year.

For example, in the USA structure fires are categorized as residential and non-residential. In 2016, there were 371,500 residential structure fires, accounting for 78.1 percent of all structure fires, a decrease of 16,500 fires over 2015. Of these fires, 257,000 occurred in one- and two-family homes, accounting for 54.0 percent of all structure fires. Another 95,000 fires occurred in apartments (20.0 percent of the structure fire total). The total number of home fires for 2016 is 352,000. 81% of all fire deaths occur in home fires in the USA [3].

When the fires that occurred in Turkey have been analyzed according to building types, it is seen that most fires occurred in residential buildings.

The fire statistics bulletin for the province of Istanbul is published in certain periods by the Istanbul Metropolitan Municipality Department of Fire Brigade in Turkey. According to the fire statistics published in 2020, fires that occurred between 2015 and 2019 are classified as the building and non-building fires. When the total number of fires is examined, it is seen that 53 % of them are building fires and 36 % of the building fires are residential building fires which is shown in Table 2.

Table 2. Istanbul Metropolitan Municipality Fire Statistics.

| Year | Fires (2015-2019) | | | | | | | | | |
|------|-----------------------|----------------------|-----------------|---------|--------|----------------------|---------|--------------|--------|-------------|
| | Fire (Number) | | | | | | | | | |
| | Structure Fires | | | | | Non -structure fires | | | | |
| | Residential buildings | Industrial buildings | Other buildings | Vehicle | Total | Weed | Garbage | Forest Shrub | Total | Grand total |
| 2015 | 5.869 | 157 | 8.957 | 1.903 | 16.886 | 4.596 | 5.212 | 284 | 10.092 | 26.978 |
| 2016 | 5.910 | 153 | 8.891 | 1.935 | 16.889 | 6.110 | 5.431 | 156 | 11.697 | 28.586 |
| 2017 | 5.762 | 166 | 9.224 | 1.781 | 16.933 | 3.338 | 4.685 | 117 | 8.140 | 25.073 |
| 2018 | 4.875 | 164 | 7.377 | 1.558 | 13.974 | 2.329 | 4.051 | 62 | 6.442 | 20.416 |
| 2019 | 966 | 179 | 6.895 | 1.630 | 13.670 | 4.361 | 4.389 | 126 | 8.876 | 22.546 |

Approximately 45% of fires occurring in Turkey are residential fires. In other words, it can be said that about half of all the fires happen in the housings. At first glance, it was thought that there would be a decrease in the number of fires since there was a decrease in the number of wooden buildings. However, more use of plastic materials, an increase in the amount of energy consumed and new types of energy bring about the risk of fire. Every year a lot of people die because of residential fires and the majority of those people are children. The number of fires is directly proportional to the number of housings. No doubt, as the population and housings increase, the number of fires increases. 40% of housing fires result from kitchens, 20% from heaters i.e from stoves and electric heaters, 10% from cigarettes, and 5% from children and electrical installations. In other words, the majority of the fires in the housings are caused by electrical and heating devices [4].

Other international scientific researches on fire safety in housings are as follows: Himoto & Shinora & et al. [5] report on their investigations into the behavior of successive fire spread between multiple houses in an urban area.

Akashah, Baaki, Lee, [6] aims to determine the fire risk status of low-cost high-rise residential buildings in Kuala Lumpur through a fire risk assessment (FRA) approach. The study forms the exploratory phase of wider research to develop a fire risk indexing (FRI) methodology for low-cost high rise residential buildings in Kuala Lumpur.

Hardie, Green & He's [7] purpose is to identify potential faults in building fabric that may result in unacceptable fire safety risks to irreplaceable heritage streetscapes. Ploubidis, Edwards, & Kendrick's, [8]

paper reports the development and testing of a construct measuring parental fire safety behaviors for planning an escape from a house fire.

The purpose of another paper is to investigate the design and operation factors that affect the provision of fire‐ safe student housing facilities and to present the development of a proposed operational framework for fire safety evaluation of student housing facilities [9].

A novel application of statistical analysis of structural fire hazards that were found in heritage housing stock in a metropolitan area has been made by He,& Park [10].

In the study of Hewitt, et al. [11] qualitative results are presented from the analysis of volatile and semi-volatile organic compounds (VOCs/SVOCs) obtained through a sampling of gaseous effluent and condensed particulates during a series of experimental house fires conducted in a real house.

Szumigała, & Polus [12], in their paper, presents a practical, engineering algorithm that may be used to analyze fire resistance of the Klein's ceiling after its renovation. The authors of another article present a building fire risk analysis model based on scenario clusters and its application in fire risk management of residential buildings. The purpose of Lehna, et al's[13] study was to describe the home fire safety quality improvement model designed to aid organizations in achieving institutional program goals. Butry [14], in his analysis, sprinkler performance is measured by comparing 'like' structure fires, while conditioning on smoke detection technology and neighborhood housing and socioeconomic conditions, using propensity score matching. A simplified risk-based decision-support tool, the Fire Risk Model (FRM), was developed for residential highrise buildings by Hansen [15]. The research of McDermott, Haslam, R., & Gibb [16] examined occupier behavior about self-closing fire doors. In another paper which belongs to Liu & Chow [17], a literature review was made on design fires and fire load survey methods for buildings. The concept of probabilistic modeling under uncertainty within the context of fire and rescue through the application of the Bayesian network (BN) technique is presented in Matellinis[18] study. Xiong, Bruck, & Ball's [19] study compares the odds ratio (OR) values of factors associated with accidental residential fires where an individual has died versus fires where all occupants have survived. The methodology used in the development of a fire safety evaluation scheme for patient areas in hospitals has been utilized and applied to dwellings in the study of Shields, et al [20]. In the first of 3 different articles by Başdemir, Demirel, and İşeri [21-22-23] that can contribute to the issue of fire safety in residences, national and international literature on fire safety was searched, in the second an automatic model was developed that evaluates the buildings according to the national fire regulations, in the third a hospital project was evaluated in terms of fire safety. In another study conducted by Başdemir [24], research was carried out on fire safety measures in all construction sites, including dwelling construction.

3. ANALYSIS OF SAMPLE RESIDENTIAL BUILDINGS

The aim of this research is to analyze how Turkey's Regulation on Fire Protection (TRFP) influence fire safety precautions in housing design and construction. Tokat province center, which is one of the less populated cities of the country, has been chosen as the study area. The reason for choosing Tokat is to see the effect of the TRFP on less populated cities. Since the research requires a lot of time and many assistant researcher, a limited number of residential buildings which have been designed and built in Tokat were selected as the sample.

According to the Disaster and Emergency Management Presidency Tokat Provincial Directorate's statistics there occurs lots of fire in Tokat city center every year which are shown in Table 3. Most of them are Structural fires and residential fires which are shown in Table 4.

Table 3. The fire statistic of fires in Tokat city center from 2010 to 2019

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tokat Center | 388 | 563 | 449 | 724 | 675 | 684 | 693 | 648 | 696 | 719 |

Table 4 The fire statistic of structure fires in Tokat city center from 2010 to 2019

| | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Tokat Center | 140 | 92 | 122 | 92 | 71 | 93 | 75 | 72 | 65 | 78 |

3.1. RESEARCH METHOD

In the study, 10 residential buildings were analyzed according to 20 criteria selected from TRFP. Evaluation criteria were chosen from passive fire precautions. TRFP entered into force in 2002 throughout Turkey. For this reason, 5 of the residential buildings were chosen from those built before 2002, and the other 5 from those built after 2009. The reason for choosing 2009 is to make a more accurate assessment after the TRFP has been used and adopted for a while. In the study, firstly, architectural projects were examined, then on-site investigations were made. Finally, the project managers were interviewed. According to the data obtained, the effect of BYKHYY on passive fire safety measures in new buildings was evaluated.

The five residential buildings selected for the study are buildings that were built before 2002 when the TRFP entered into force is given in Table 5.

Table 5. The information of analyzed residential buildings which were built before 2002

| The information | 1.Residential building | 2.Residential building | 3.Residential building | 4.Residential building | 5.Residential building |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Total construction area | 4037 m ² | 1750 m ² | 1485 m ² | 3890 m ² | 1275 m ² |
| Building height | 20,30 m | 17,60 m | 12,80 m | 14.50 m | 14,60 m |
| Building Settlement | Detached building | Detached building | Contiguous building | Contiguous building | Contiguous building |
| Ground floor usage | Housing | Housing | Housing | Shopping | Shopping |

The other five housings were selected from residential buildings which were designed and built after the amendments in the regulation in 2009 is given Table 6.

Table 6. The information of analyzed residential buildings which were built after 2002

| The information | 1.Residential building | 2.Residential building | 3.Residential building | 4.Residential building | 5.Residential building |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Total construction area | 12598 m ² | 4375 m ² | 4967 m ² | 25040 m ² | 7072 m ² |
| Building height | 37,74 m | 39,16 m | 38.60 m | 54,50 m | 39,60m |
| Building Settlement | Contiguous building | Detached building | Detached building | Detached building | Detached building |
| Ground floor usage | Shopping | Shopping | Shopping | Housing | Housing |

When the existing residential buildings in Tokat City Center which were built before 2002 were examined, it has been seen that there were a few buildings that meet high building conditions. It has also been seen that the number of high buildings has increased after 2009.









The TRFP codes used to examine the sample buildings in the study and the subject headings in the TRFP are given in Table 7, Table 8 and Table 9.

Table 7. 20 criteria selected from TRFP for the analysis of the residential.

| | | |
|----|-------|---|
| 1 | 22.2 | Access to Building |
| 2 | 23.5 | Stability of Building Bearing System |
| 3 | 24.4 | Fire Compartments |
| 4 | 27.1 | Facades |
| 5 | 32.4 | Escape Distance |
| 6 | 33.1 | Escape Route Width |
| | 33.2 | Escape Route and Escape Route Stair Width in High Buildings |
| 7 | 33.5b | Exit Door Width |
| 8 | 34.2 | Fire Resistance of Fire Safety Hall |
| 9 | 34.3 | Fire Safety Hall Area |
| 10 | 39.1 | Emergency Exit Obligation |
| 11 | 41.3 | Number of Steps of Escape Stairs |
| 12 | 41.4 | Landing Scales of Escape Stairs |
| 13 | 41.5 | Doors of Escape Stairs |
| 14 | 41.7 | Properties of Escape Stairs |
| 15 | 41.8 | Properties of Escape Stairs |
| 16 | 45.1 | Ventilation of Escape Stairs |
| 17 | 47.1 | Doors of Escape Route |
| 18 | 48.5 | Special Situations of Housings |
| 19 | 72.3 | Emergency Lighting System |
| 20 | 97.1 | Water connection for fire fighting |

The analyze results of buildings which were built before the TRFP enters into force are given in Table 8

Table.8 The analysis of 5 residential buildings which were built before the TRFP enters into force

| | | Before the year 2002 (Before the Turkey's Regulation on Fire Protection) | | | | |
|------------|--|---|---|--|---|---|
| ARTICLE NO | THE ANALYZED CRITERIA AND TURKEY'S REGULATION ON FIRE PROTECTION (TRFP) ARTICLE NO | 1. Residential building | 2. Residential building | 3. Residential building | 4. Residential building | 5. Residential building |
| | | | |  |  |  |
| | |  |  |  |  |  |
| 1 | Access To Building. Article: 22(2) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 2 | Stability Of Building Bearing System Article: 23(5) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE |
| 3 | Fire Compartments Article: 24(4) | EXEMPT | UNSUITABLE | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT |
| 4 | Facades Article: 27(1) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 5 | Escape Distance Article: 32(4) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE |
| 6 | Escape Route Width Article: 33(1-2) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 7 | Exit Door Width Article: 33(5b) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 8 | Fire Resistance Of Fire Safety Hall ARTICLE:34(2) | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT |
| 9 | Fire Safety Hall Area Article:34(3) | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT |
| 10 | Emergency Exit Obligation Article:39(1) | UNSUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE |
| 11 | Number Of Steps Of Escape Stairs Article:41(3) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 12 | Landing Scales Of Escape Stairs Article:41(4) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 13 | Doors Of Escape Stairs Article:41(5) | EXEMPT | UNSUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE |
| 14 | Properties Of Escape Stairs (Steps) ARTICLE: 41(7) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 15 | Properties Of Escape Stairs ARTICLE:41(8) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 16 | Ventilation Of Escape Stairs ARTICLE:45(1) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 17 | Doors Of Escape Route ARTICLE:47(1) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 18 | Special Situations Of Housings ARTICLE:48(5) | UNSUITABLE | EXEMPT | SUITABLE | SUITABLE | EXEMPT |
| 19 | Emergency Lighting System Article:72(3) | UNSUITABLE | EXEMPT | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE |
| 20 | Water Connection For Fire Fighting ARTICLE:97(1) | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT | EXEMPT |
| | NUMBER OF SUITABLE CRITERIA | 11 (%55) | 9 (%45) | 13 (%65) | 11 (%55) | 11 (%55) |
| | NUMBER OF UNSUITABLE CRITERIA | 4 (%20) | 6 (%30) | 3 (%15) | 5 (%25) | 4 (%20) |
| | NUMBER OF EXEMPTED CRITERIA | 5 (%25) | 5 (%25)h | 4 (%20) | 4 (%20) | 5 (%25) |

The analyze results of buildings which were built after the TRFP enters into force are given in Table 9

Table.9 The analysis of 5 residential buildings which were built after the TRFP enters into force

| | | After the year 2009 (After the National Fire Regulation) | | | | |
|------------|--|---|---|--|---|---|
| ARTICLE NO | THE ANALYZED CRITERIA AND TURKEY'S REGULATION ON FIRE PROTECTION (TRFP) ARTICLE NO | 1. Residential building | 2. Residential building | 3. Residential building | 4. Residential building | 5. Residential building |
| | |  |  |  |  |  |
| 1 | Access To Building. Article: 22(2) |  |  |  |  |  |
| 1 | Access To Building. Article: 22(2) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 2 | Stability Of Building Bearing System Article: 23(5) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 3 | Fire Compartments Article: 24(4) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 4 | Facades Article: 27(1) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE |
| 5 | Escape Distance Article: 32(4) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 6 | Escape Route Width Article: 33(1-2) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 7 | Exit Door Width Article: 33(5b) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 8 | Fire Resistance Of Fire Safety Hall ARTICLE:34(2) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 9 | Fire Safety Hall Area Article:34(3) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE |
| 10 | Emergency Exit Obligation Article:39(1) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 11 | Number Of Steps Of Escape Stairs Article:41(3) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 12 | Landing Scales Of Escape Stairs Article:41(4) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 13 | Doors Of Escape Stairs Article:41(5) | UNSUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 14 | Properties Of Escape Stairs (Steps) ARTICLE: 41(7) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| 15 | Properties Of Escape Stairs ARTICLE:41(8) | SUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 16 | Ventilation Of Escape Stairs ARTICLE:45(1) | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 17 | Doors Of Escape Route ARTICLE:47(1) | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 18 | Special Situations Of Housings ARTICLE:48(5) | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 19 | Emergency Lighting System Article:72(3) | SUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | SUITABLE |
| 20 | Water Connection For Fire Fighting ARTICLE:97(1) | SUITABLE | UNSUITABLE | UNSUITABLE | SUITABLE | UNSUITABLE |
| | NUMBER OF SUITABLE CRITERIA | 11 (%55) | 8 (%40) | 14 (%70) | 18 (%90) | 14 (%70) |
| | NUMBER OF UNSUITABLE CRITERIA | 9 (%45) | 12(%60) | 6 (%30) | 2 (%10) | 6 (%30) |
| | NUMBER OF EXEMPTED CRITERIA | - | - | - | - | - |

4. FINDINGS

4.1. The Analysis Results of 5 Residential Buildings Which Were Constructed Before the TRFP

20 (100%) criteria were determined to analyze residential buildings. The analysis results are as follows; the first residential building is suitable for 11 (55%) criteria, is not suitable for 4 (20%) criteria, and is exempted from 5 (25%) criteria. The second residential building is suitable for 9 (45%) criteria, is not suitable for 6 (30%) criteria, and is exempted from 5 (25%) criteria. The third residential building is suitable for 13 (65%) criteria, is not suitable for 3 (15%) criteria, and is exempted from 4 (20%) criteria. The fourth residential building is suitable for 11 (55%) criteria, is not suitable for 5 (25%) criteria, and is exempted from 4 (20%) criteria. The fifth residential building is suitable for 11 (55%) criteria, is not suitable for 4 (20%) criteria, and is exempted from 5 (25%) criteria

Regarding the 5 residential buildings constructed before the Regulation enters into force, it was found that 5 buildings were suitable for a total of 55 criteria (55%), were not suitable for 22 criteria (22%), and were exempted from 23 criteria (22%). This information is shown in Figure 1.

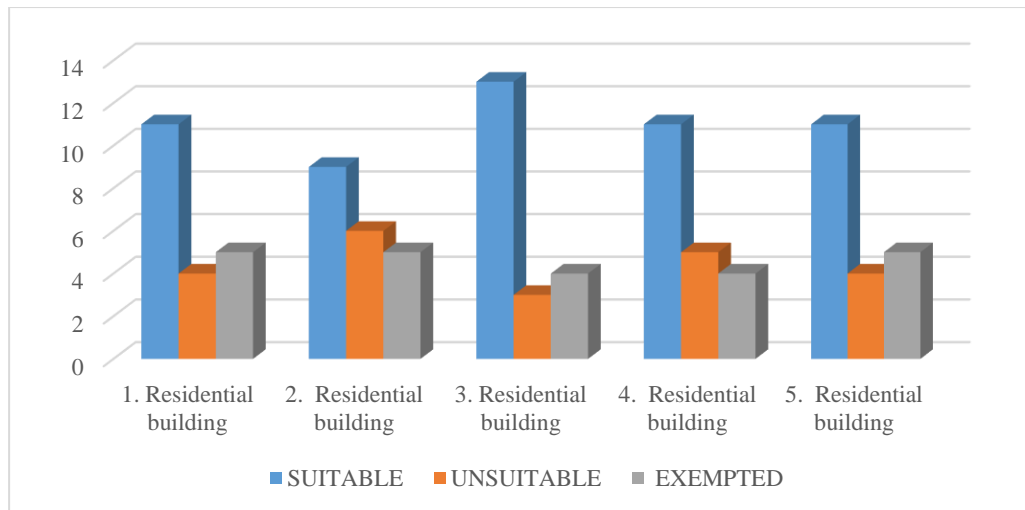


Figure 1. The number of suitable and unsuitable criteria of the residential before TRFP

The buildings examined in this part of the research are low-rise buildings. The total construction areas and the width and depth of the facade are not large. According to findings, unsuitable FTRP articles are as follows:

- Stability of Building Bearing System (Article: 23(5)) is not suitable. It was determined that the cover in the reinforcements was 2.5 cm in the columns and beams and 1.5 cm in floorings. However, according to TRFP, it should be 4 cm in columns and 2.5cm in floorings
- Emergency Exit Obligation (Article:39(1)) is not suitable. There aren't any exit signs on the escape routes.
- Emergency Lighting System (Article:72(3)) is not available

4.2. The Analysis Results of 5 Residential Buildings Which Were Constructed After the TRFP Entered Into Force

20 (100%) criteria were determined to analyze residential buildings. The analysis results are as follows; the first residential building is suitable for 11 (55%) criteria and is not suitable for 9 (45%) criteria. The second residential building is suitable for 8 (40%) criteria and is not suitable for 12 (60%) criteria. The third residential building is suitable for 14 (70%) criteria and is not suitable for 6 (30%) criteria The fourth

residential building is suitable for 18 (90 criteria and is not suitable for 2 (10%) criteria. The fifth residential building is suitable for 14 (70%) criteria and is not suitable for 6 (30%) criteria.

Regarding the 5 residential buildings which were built after the Regulation entered into force, it was found that 5 buildings were suitable for a total of 65 criteria (65%) and were not suitable for 35 criteria (35%). This information is shown in Figure 2

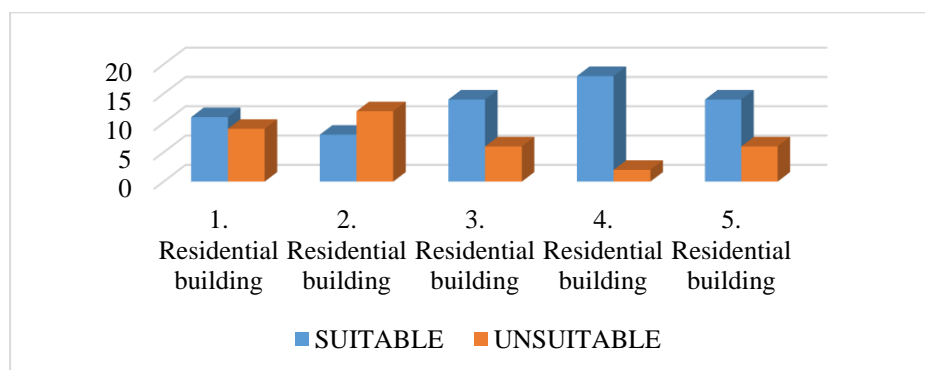


Figure 2. The number of suitable and unsuitable criteria of the residential after TRFP

The residences analyzed in this section are those that were built at least 7 years after the TRFP became official. Despite this, it is seen in figure 2 that there are deficiencies in fire precautions in the residential in this section.

The buildings examined in this part of the research are low-rise buildings. The total construction areas and the width and depth of the facade are large. According to findings, unsuitable FTRP articles are as follows:

- Stability of Building Bearing System (Article: 23(5)) is not suitable in two residential in this part. It was determined that the cover in the reinforcements was 2.5 cm in the columns and beams and 1.5 cm in floorings. However, according to TRFP, it should be 4 cm in columns and 2.5cm in floorings
- Fire Compartments (Article: 24(4)) are not available. It has been determined that architects and engineers do not know what compartmentalization is. Therefore, this item is lacking.
- According to Article: 27(1) the façades of high-rise buildings should be made of hardly flammable materials, but It has been determined that easily flammable insulation materials have been used in all the five residential in this part.
- Fire Safety Hall Area (Article:34(3)) are not suitable for four residential. Area dimensions are not appropriate, security hall entrance and exit directions are wrong.
- Water connection for fire fighting (Article:97(1)) is not available in three residential.
- It has been evaluated that the deficiency in this section is because all of the examined buildings are high-rise residences. Fire prevention measures in high-rise buildings are more complex and costly. In addition, it is seen that engineers, architects, and contractors are not adequately audited to comply with TRFP provisions.

4.3. Comparison Of Findings In Pre TRFP (The Year 2002) And After TRFP (The Year 2009) Residentials

As seen in Figure 3 same deficiency in two groups of residents is the Stability of Building Bearing System (Article: 23(5)) that the cover in the reinforcements was 2.5 cm in the columns and beams and 1.5 cm in floorings. However, according to TRFP, it should be 4 cm in columns and 2.5cm in floorings

The other shortcomings vary. It can also be seen that according to the results of the comparison, an improvement has been determined in the fire safety of the residential buildings which were designed after Turkey's Regulation on Fire Protection (TRFP) which is shown in Figure 3. However, It has not reached the desired level yet.

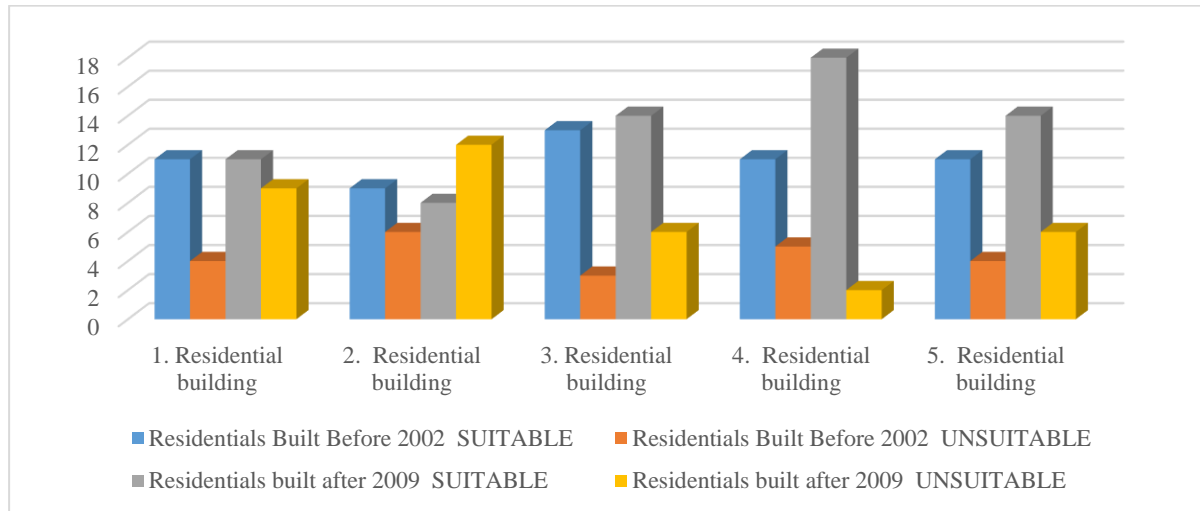


Figure 3. Comparison of residential findings which have been built before 2002 and after 2009

The analyzed residential buildings which have been built after TRFP are high-rise buildings. That property makes the fire safety precautions complicated, difficult, and more costly. Despite that, the fire safety precautions are better than the first group residential buildings.

If the fire regulations are well understood by architects, engineers, and contractors who design and build residential buildings in Turkey, fire safety in houses will be better. To achieve this, experts who took part in the preparation of the Regulation and know the regulation well should carry out the training, every where in Turkey.

5. CONCLUSION

Individuals, institutions, and organizations working in the field of fire and fire safety are all valuable separately. To make the work done more effectively, we should bring together the work of individuals, institutions, and organizations and combine them with the same goal. It is a vital need to initiate, develop and maintain a system that will protect our residential, cities and ensure the safety of its inhabitants all over the Turkey.

REFERENCES

- [1] Official Newspaper (2009). Turkey's Regulation on Fire Protection. Decision Number, 15316,22.
- [2] Statistics, F. (2021). State Institute of Statistics Prime Ministry Republic of Turkey. *SIS, Ankara*.
- [3] Haynes, H.J. (2017). <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Overall-Fire-Statistics/osFireLoss>.
- [4] Kılıç, A., (2014) Konutlarda Yangın Kaçışları. *Yangın Güvenlik Dergisi*. 165, 8-9.
- [5] Himoto, K., Shinohara, M., Takanashi, K., Saiki, H., & Sekizawa, A. (2018). A field experiment on fire spread within a group of model houses. *Fire Safety Journal*(96), 105-114.
- [6] Akashah, F. W., Baaki, T. K., & Lee, S. P. (2017). Fire Risk Assessment of Low Cost High Rise Residential Buildings in Kuala Lumpur: A Case Study. *Journal of Design and Built Environment*, 124-139.
- [7] Hardie, M., Green, M., & He, Y. (2014). Fire and Heritage Protection In Australian Public Housing. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*;, 196-212.

- [8] Ploubidis, G. B., Edwards, P., & Kendrick, D. (2015). Measuring behaviours for escaping from house fires: use of latent variable models to summarise multiple behaviours. *BMC research notes*, 8(1), 789
- [9] Hassanain, M. A. (2008). Fire safety in the design and operation of student housing facilities. *Structural Survey*, 2008, Vol. 26, Issue 1, pp. 55-62., 26(1), 55-62.
- [10] He, Y., & Park, L. A. (2017). A statistical analysis of occurrence and association between structural fire hazards in heritage housing. *Fire Safety Journal*, 90, 169-180.
- [11] Hewitt, F., Christou, A., Dickens, K., Walker, R., & Stec, A. A. (2017). Release of volatile and semi-volatile toxicants during house fires. *Chemosphere*, 173, 580-593.
- [12] Szumigala, M., & Polus, Ł. (2017). Fire resistance of the ceiling in the old tenement house. *Procedia Engineering*, 195, 178-182.
- [13] Lehna, C., Twyman, S., Fahey, E., Coty, M. B., Williams, J., Scrivener, D., ... & Myers, J. (2017). An organizational process for promoting home fire safety in two community settings. *burns*, 43(1), 162-168.
- [14] Butry, D. T. (2012). Comparing the performance of residential fire sprinklers with other life-safety technologies. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 480-494.
- [15] Hansen, N. D., Steffensen, F. B., Valkvist, M., Jomaas, G., & Van Coile, R. (2018). A fire risk assessment model for residential high-rises with a single stairwell. *Fire Safety Journal*, 95, 160-169.
- [16] McDermott, H., Haslam, R., & Gibb, A. (2010). Occupant interactions with self-closing fire doors in private dwellings. *Safety science*, 48(10), 1345-1350.
- [17] Liu, J., & Chow, W. K. (2014). Determination of fire load and heat release rate for high-rise residential buildings. *Procedia Engineering*, 84, 491-497
- [18] Matellini, D. B., Wall, A. D., Jenkinson, I. D., Wang, J., & Pritchard, R. (2013). Modelling dwelling fire development and occupancy escape using Bayesian network. *Reliability Engineering & System Safety*, 114, 75-91.
- [19] Xiong, L., Bruck, D., & Ball, M. (2015). Comparative investigation of 'survival' and fatality factors in accidental residential fires. *Fire Safety Journal*, 73, 37-47.
- [20] Shields, T. J., Silcock, G. W., & Bell, Y. (1986). Fire safety evaluation of dwellings. *Fire safety journal*, 10(1), 29-36.
- [21] Başdemir, H., & Demirel, F. (2010). Binalarda Pasif Yangın Güvenlik Önlemleri Bağlamında Bir Literatür Araştırması. *Politeknik Dergisi*, 13(2), 101-109.
- [22] Başdemir, H., Demirel, F., & İşeri, İ., (2012). Developing A Model For Analyse Fire Safety In Buildings According To National Fire Precaution Regulation. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University* , Vol.27, No.4, 695-706.
- [23] Demirel, F., Başdemir, H., & İşeri, İ., (2012). A Hospital Project In The Context Of Fire Safety Precautions And Compliance Analysis With National Legislation. *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University* , Vol.27, No.4, 729-738.
- [24] Başdemir, H. A Literature Review Of Fire Safety In Construction Sites. *Gazi University Journal Of Science Part B: Art Humanities Design And Planning*, 7(1), 199-209.

Effect of Al-5Ti-1B Grain Refiner Added to Al7075 Alloy on Aging, Microstructure, Hardness and Corrosive Properties

Mete Berke YAMAN¹  Engin KOCAMAN^{2,*}  Barış AVAR¹ 

¹Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Metallurgical and Materials Engineering, 67100, Merkez/ZONGULDAK

²Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Aerospace Engineering, 67100, Merkez/ZOBGULDAK

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 22.08.2022
Revision: 5.10.2022
Accepted: 24.10.2022

Highlights

- Effect of grain refiner on Al7075
- Effect of Al5Ti1B on precipitation hardening
- Corrosion behavior of Al7075 alloy with Al5Ti1B added

Keywords

Aluminum 7075 alloy
Al-5Ti-1B grain refiner
Precipitation hardening
Hardness
Corrosion

In this study, the effect of Al5Ti1B grain refiner in different ratios added to Al7075 on precipitation hardening, microstructural properties, hardness and corrosion resistance of the alloy was investigated.

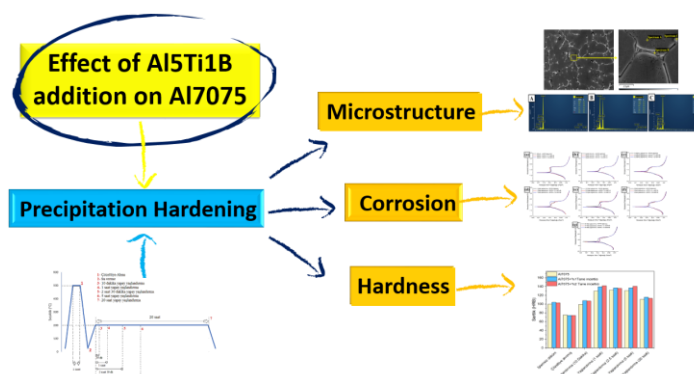


Figure A. Flow charts of experiments

Purpose: Thanks to the grain refiner master alloys added to the cast aluminum alloys in molten form, the alloy becomes finer grain structure and the castability, mechanical properties and chemical properties of the alloy can be improved. In this study, grain refiner master alloy, which is mostly added to cast aluminum alloys, was added to Al7075, a wrought aluminum alloy, and its effect on the microstructure, heat treatment and corrosion behavior of the alloy was investigated.

Theory and Methods: Al5Ti1B grain refiner at the rate of 0%, 1% and 2% by weight was added to the Al7075 alloy melted in the electric resistance furnace and poured into the metal mold. Cast samples were taken into solution at 500 °C and aged for 10 min., 1 hour, 2.5 hr., 5 hr. and 20 hr. Afterwards, the samples characterized using an optical microscope, SEM, EDS and XRD. The hardness of the samples was measured using a 62.5 kg load and 2.5 mm steel ball in Brinell hardness mode. Corrosion tests were performed in 0.5 M NaCl solution at a potential range of -1 to 1 V and a scanning rate of 1 mV/sec.

Results: The findings obtained as a result of the study show that; It has been found that grain refinement is very effective on Al7075, which is a wrought aluminum alloy. Grain refinement process caused changes in the properties of both the casting condition and precipitation hardening condition of the alloy.

Conclusion: Addition the grain refiner to the Al7075 alloy, it was determined that the intermetallic structures in the microstructure of the alloy became thinner and more homogeneously distributed in the structure. In addition, it is understood that the microstructure, which exhibits a dendritic solidification, turns into a equiaxial grain structure and the grain size decreases with the addition of grain refiner. It was observed that the addition of grain refiner increased the hardness value for both casting and precipitation hardening condition of the alloy. It has been observed that the addition of grain refiner affects the corrosion resistance of the alloy positively for low aging times but negatively for increasing aging times.



Effect of Al-5Ti-1B Grain Refiner Added to Al7075 Alloy on Aging, Microstructure, Hardness and Corrosive Properties

Metem Berke YAMAN¹ Engin KOCAMAN^{2,*} Barış AVAR¹

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez/ZONGULDAK

²Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez/ZONGULDAK

Abstract

In this study, precipitation hardening heat treatment was applied at 200 °C for 10 minutes, 1 hour, 2.5 hours, 5 hours, and 20 hours by adding 1% and 2% by weight Al-5Ti-1B grain refiner to Al7075 alloy, which is a critical material, especially in the aviation industry. Microstructural analyses, hardness, and corrosion tests of all alloys with and without adding grain refiner were carried out. From the obtained results, it was determined that the grain refiner added to the alloy reduced the grain size of the alloy by ~24%. In addition, the hardness values of the alloys with the addition of grain refiner increased by ~4.5% after casting and up to ~9.5% after precipitation hardening. In general, the corrosion potentials of the grain refiner added alloys were more positive than the Al7075 alloy. Similarly, the corrosion current density values of the alloys with a grain refiner added were lower than the Al7075 alloy.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22.08.2022
Düzeltilme: 5.10.2022
Kabul: 24.10.2022

Keywords

Aluminum 7075 alloy
Al-5Ti-1B grain refiner
Precipitation hardening
Hardness
Corrosion

Anahtar Kelimeler

Alüminyum 7075 alaşımı
Al-5Ti-1B tane inceltici
Çökeltme sertleşmesi
Sertlik
Korozyon

Al7075 Alaşımına İlave Edilen Al-5Ti-1B Tane İncelticinin Yaşlanma, Mikroyapı, Sertlik ve Korozyon Özelliklerine Üzerindeki Etkisi

Öz

Bu çalışmada, özellikle havacılık endüstrisi için kritik bir malzeme olan Al7075 alaşımına ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilerek 200 °C'de 10 dakika, 1 saat, 2,5 saat, 5 saat ve 20 saat süre ile çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmıştır. Tane inceltici ilave edilen ve edilmeyen tüm alaşımların mikroyapısal analizleri ile sertlik ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan alaşıma ilave edilen tane incelticinin alaşımın tane boyutunu ~%24 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, tane inceltici ilave edilen alaşımların sertlik değerleri, döküm sonrası ~%4.5, çökeltme sertleşmesi sonrası ~%9.5'e kadar artış göstermiştir. Genel olarak tane inceltici ilave edilen alaşımların korozyon potansiyelleri, Al7075 alaşımına göre daha pozitif çıkmıştır. Benzer şekilde tane inceltici ilave edilen alaşımların korozyon akım yoğunluğu değerleri, Al7075 alaşımına göre daha düşük olarak ölçülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (Al), demir dışı metaller içerisinde en yüksek kullanım oranına sahip ve her geçen gün popülerliğini artıran bir metaldir. Al ve alaşımlarının bu derece fazla kullanılmasının başlıca nedenleri yoğunluğunun düşük olması, spesifik mukavemet değerinin yüksek olması, yüksek süneklilik ve iyi termal iletkenliğe sahip olması şeklinde sıralanabilir [1]. Ayrıca Al ve alaşımlarının yüzeylerinde oluşan kararlı alüminyum oksit (Al₂O₃) tabakası bu metali birçok korozyon ortamına karşı dirençli hale getirmektedir [2]. Bu özellikler Al alaşımlarını otomotiv sanayi, havacılık ve uzay araçları, gemi-inşa sektörü ve savunma sanayi gibi alanlarda sıklıkla tercih edilir hale getirmiştir [3–5]. Al ve alaşımlarının sahip olduğu diğer bir önemli özellik ise sertlik ve mukavemetlerinin çökeltme sertleşmesi veya yaşlandırma olarak bilinen bir ısıl işlem ile artırılabilir olmasıdır. Al alaşımlarının içerisine ilave edilen Cu, Zn, Mg ve Si gibi elementler, ana fazda

oluşturdukları intermetalik yapılar ile bu alaşıma çökelme sertleşmesi işlemi uygulanabilir hale getirirler. Dövme alüminyum alaşımları içerisinde ısıl işlem uygulanabilen seriler 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlardır [6]. Bu alaşımlar içerisinde ise 7XXX serisi sağladığı sertlik ve mukavemet değerleri bakımından diğerlerine nazaran daha iyi sonuçlar vermesi sayesinde özellikle havacılık ve uzay sanayi için vazgeçilmez malzemelerden biri haline gelmiştir. Bununla birlikte, Al alaşımları içerisinde sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle Al7075 alaşımı önemli bir yere sahiptir. Ana alaşım elementleri Zn, Mg ve Cu olan Al7075 alaşımının mikroyapısında bu elementlerin oluşturduğu $MgZn_2$, $Al_2Mg_3Zn_3$, Al_2CuMg , Al_2Cu , Al_3Fe_4 ve Mg_2Si intermetalik fazlar bulunmaktadır [7,8].

Günümüzde alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri alaşım elementi ilavesi [9,10], ısıl işlem [11] gibi çeşitli yöntemler ile geliştirilebilirken bu yöntemlere alternatif olarak tane inceltici ilavesi [12] ile alaşımın özelliklerinin geliştirilebildiği bilinmektedir. Özellikle döküm Al alaşımlarında sıklıkla karşımıza çıkan tane inceltme uygulamaları sayesinde döküm alaşımın mukavemeti, sertliği ve korozyon özelliklerinde iyileşmeler görülebilmektedir [13,14]. Al alaşımlarında tane inceltme olarak bilinen bu işlem eriyik içerisine çubuk veya tabletler şeklinde önceden alaşımlanmış master alaşımın ilave edilmesi esasına dayanmaktadır [15]. İlave edilen bu master alaşım, nihai mikroyapıda tane boyutunu küçülmesine ve mekanik özelliklerin artmasına yarayan bir prosestir [16,17]. Ayrıca tane inceltme sayesinde döküm Al alaşımlarının sıcak yırtılma direnci ve kalıp içerisinde eriyik metalin besleme kabiliyeti artmakta ve porozite riski azalmaktadır [18]. Dolayısıyla tane inceltme işlemiyle alaşımın dökülebilirlik özellikleri geliştirilebilmektedir. Master alaşım ilavesi ile tane inceltme mekanizması henüz tamamen açıklamamakla birlikte genel yaklaşım eriyik içerisine ilave edilen tane inceltici master alaşımın oluşturduğu bileşiklerin eriyik Al içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak alaşımın daha ince taneli olmasını sağlamaktadır [19]. Günümüzde ticari olarak en çok tercih edilen Al-Ti-B sistemine ait master alaşımlar, ergimiş Al içerisine ilave edilmesi sonucu eriyikte $TiAl_3$ ve AlB_2 gibi çözünen ve yarı çözünen ya da TiB_2 gibi çözünmeyen intermetalik bileşikler oluşturmakta ve katılma esnasında bu intermetalik fazlar heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranarak mikroyapının daha ince taneli katılmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde alaşım içerisine ilave edilen tane incelticinin alaşımın ısıl işlem özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada Al7075 alaşımına Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilerek alaşımın çökelme sertleşmesi ısıl işlemi üzerindeki etkisi mikroyapısal, sertlik ve korozyon özelliklerinin değerlendirilmesi için incelenmiştir.

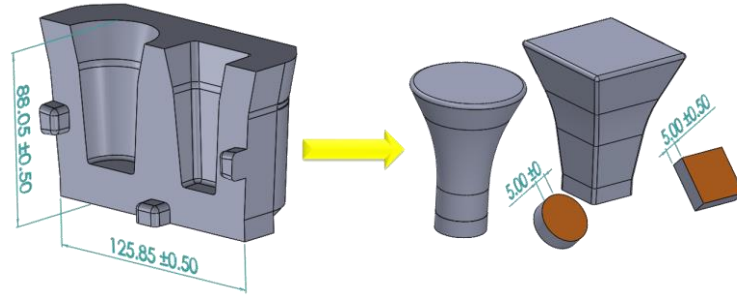
2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Metal Reyonu firmasından temin edilen ve Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen Al7075 alaşımı 2 kg kapasiteli SiC potalara uygun ağırlıkta tartılarak Protherm marka Pt600 model kamara tipi fırında ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. 760 °C’de ergitilen Al7075 alaşımı içerisine ağırlıkça %0, %1 ve %2 olmak üzere Al5Ti1B tane inceltici master alaşımı ilave edilmiştir.

Tablo 1. Al7075 alaşımının spektral analiz sonucu

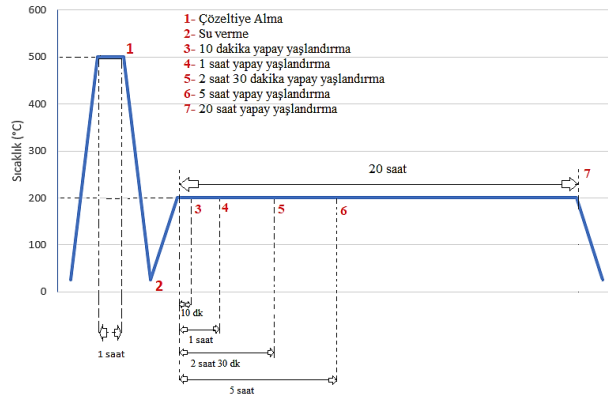
| Element | Zn | Mg | Cu | Fe | Si | Cr | Ti | Al |
|---------|------|------|------|------|------|-----|------|-------|
| ağ.% | 5.09 | 2.20 | 1.68 | 0.23 | 0.17 | 0.1 | 0.09 | Kalan |

Ergitme işlemi sonrasında 15 dakika fırında bekletilen alaşım, yaklaşık 720-725 °C’de Şekil 1’de şematik görünümü verilen 250 °C’de ön ısıtılmış kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Döküm öncesi ergiyik metale azot gazı kullanılarak 5 dakika süre ile gaz giderme işlemi yapılmıştır. Döküm işlemi sonrasında Şekil 1’de görülen döküm numuneler tabandan 5 mm mesafe bırakılarak kesilmiş ve numunelere 470 °C’de 10 saat homojenizasyon işlemi uygulanmıştır. Homojenize edilen numuneler, Şekil 2’deki ısıl prosedüre göre önce 500 °C’de 1 saat bekletilmiş, sonrasında buzlu suda su verme işlemi yapılarak çözeltiye alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alınan numuneler 200 °C’de 10 dakika, 1 saat, 2.5 saat, 5 saat ve 20 saat olmak üzere 5 farklı yaşlandırma süresi ile yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 240, 600, 1200 ve 2500 grid SiC zımpara kağıdıyla zımparalanmış ve sırasıyla, 6 µm ve 1 µm elmas parlatma solüsyonları kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numuneler Keller’s çözeltisi (95 ml saf su, 1,5 ml HCl, 2,5 ml HNO₃ ve 1 ml HF) kullanılarak 15 saniye süre ile dağlanmıştır.



Şekil 1. Kokil kalıp ve numunelerin çıkarıldığı noktaların şematik görünümü

Numunelerin mikroyapı görüntüleri Lecia 1750M metal mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Optik mikroskop görüntüleri üzerinden ImageJ programı ile lineer-intercept metodu kullanılarak tane boyutu ölçümü gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi ve elementel dağılımı, Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Oxford X-MaxN 80 model enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile karakterize edilmiştir. Numuneler, çift taraflı karbon bant kullanılarak Al levha üzerine yapıştırılarak incelenmiştir. Numunelerin X-ışınları analizi (XRD) Panalytical Empyrean cihazı kullanılarak yapılmıştır. XRD analizleri, 15-90 derecelik 2θ aralığında ve $3^\circ/\text{dk}$ tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Bulut Makina Digirock-RB sertlik ölçüm cihazı kullanılarak Brinell sertlik ölçüm modunda 2,5 mm çapında çelik bilya ve 62,5 kg'lık bir yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testleri, Gamry Interface 1010-E Potentiostat ile 25°C 'de, 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde, -1 V ile 1 V tarama aralığında ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Referans elektrot olarak doymuş kalomel (SCE) elektrot ve karşıt elektrot olarak grafit kullanılmıştır.

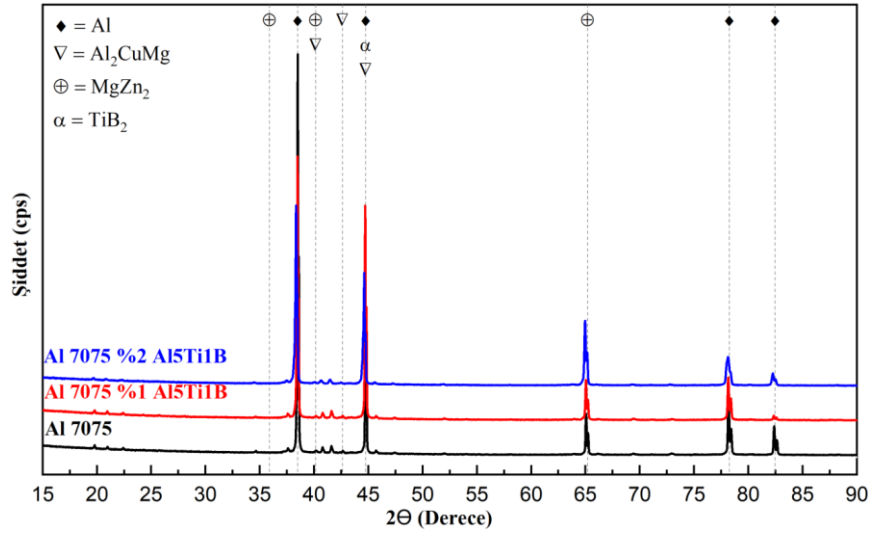


Şekil 2. Numunelere uygulanan ısıl işlem prosedürü

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

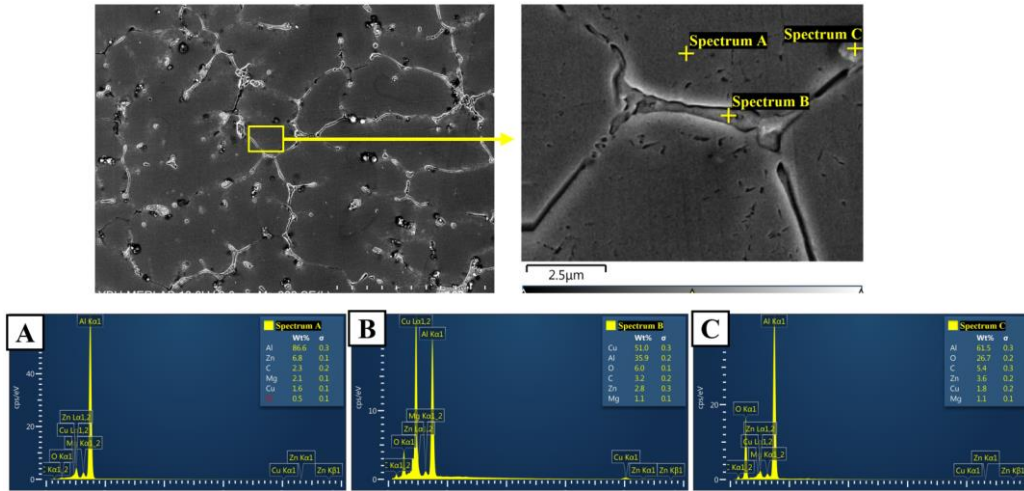
3.1. Mikroyapısal İncelemeler

Şekil 3'teki döküm numunelere ait XRD grafikleri incelendiğinde, numunelerde α -Al ve çeşitli intermetalik fazlara ait piklerin bulunduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltici ilave edilmeden dökülen Al7075 alaşımına ait XRD analizinde yapıda α -Al ile birlikte Al_2CuMg ve MgZn_2 gibi intermetalik fazlara ait piklerin bulunduğu tespit edilmiştir. Alaşım içerisine ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile mikroyapıda TiAl_3 , AlB_2 intermetalik yapıları tespit edilmezken TiB_2 fazına ait zayıf pikler belirlenmiştir. XRD analizi, Al7075 alaşımının ve bu alaşıma ilave edilen Al5Ti1B tane inceltici sonucu oluşan genel mikroyapı özelliklerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



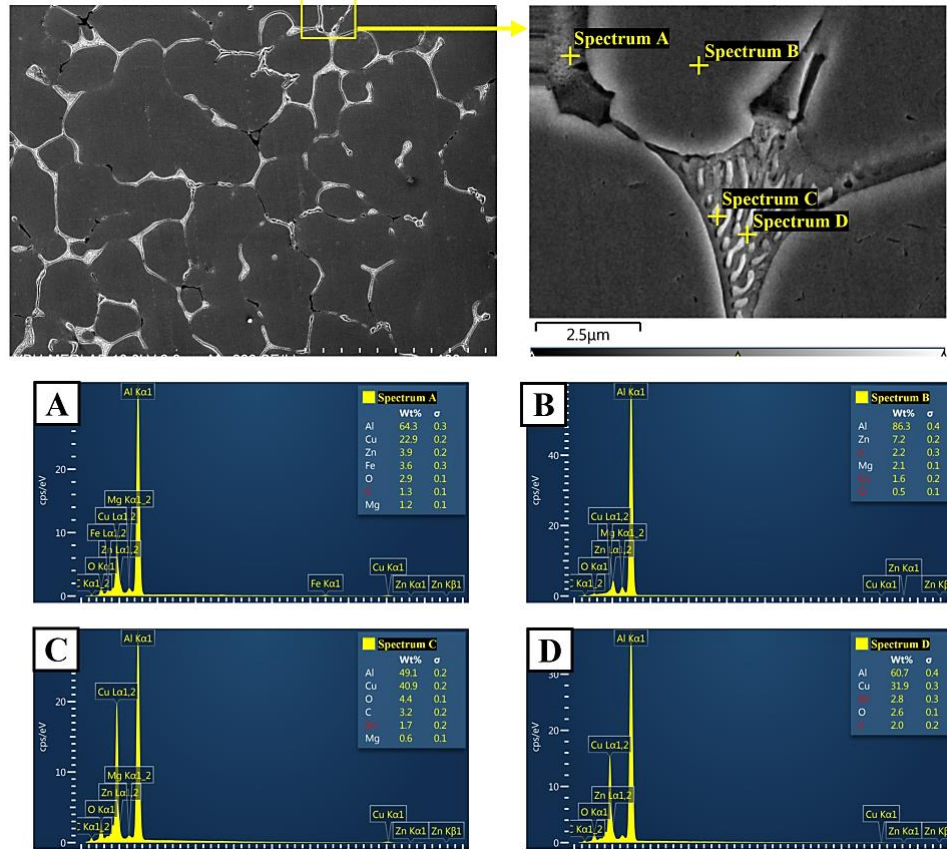
Şekil 3. Döküm işlemi sonrasındaki alaşımların XRD sonuçları

Şekil 4'te Al7075 alaşımına ait SEM görüntüleri ve yüzeyin farklı bölgelerinden alınan noktasal EDS spektrumları verilmiştir. Ana alaşım elementleri Zn, Mg ve Cu olan Al7075 alaşımının döküm mikroyapısına ait SEM görüntüsünde tane sınırları boyunca çeşitli fazların yer aldığı görülmektedir. Şekil 3'te verilen XRD analizinde tespit edilen fazlardan Al_2CuMg ve $MgZn_2$ fazlarına benzer olarak bu bölgelerde Zn, Cu, Mg içeren aluminid fazların olduğu anlaşılmaktadır. Al-Fe-Si içeren alaşımların genel mikroyapısında yer alan demir ve silisyum içeren fazların ise çin yazısı şeklinde katılaştığı benzer çalışmalarda bildirilmiştir [20]. Şekil 4'te verilen EDS spektrumlarında eser miktarda bu fazların varlığı görülmektedir.



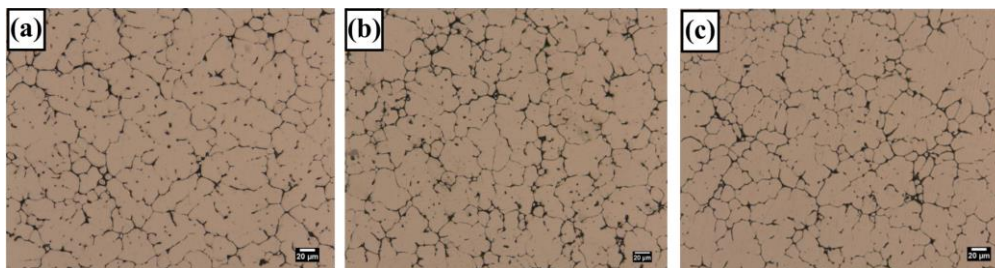
Şekil 4. Döküm işlemi sonrası Al7075 alaşımına ait SEM-EDS analiz sonucu

Şekil 5'te Al7075 alaşımına ağırlıkça %2 Al-5Ti-B tane inceltici ilave edildikten sonra alınan SEM görüntüleri ve EDS spektrumları verilmiştir. Bu sonuç, Şekil 4'teki alaşımın SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında daha homojen ve stabil bir mikroyapının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte tane inceltici ilave edilmeyen numunenin mikroyapısında yer alan tane sınırı fazlarının parçalanarak ötektik benzeri bir yapıda katılaştığı görülmektedir. Tane sınırında oluşan bu fazların bir önceki mikroyapıya benzer olarak Al7075 alaşımının ana alaşım elementleri olan Zn, Cu ve Mg'nin Al ile yaptığı intermetalik fazlardır. Literatürde çeşitli alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda Al alaşımları içerisinde ilave edilen tane incelticinin intermetalik fazlar üzerinde etkili olduğu, bu fazları morfolojik olarak etkilediği ve bazı alaşımlar için ötektik katılaşmayı teşvik ettiği belirtilmiştir [21,22].



Şekil 5. %2 Al-5Ti-B tane inceltici ilave edilen Al7075 alaşımına ait SEM-EDS analiz sonucu

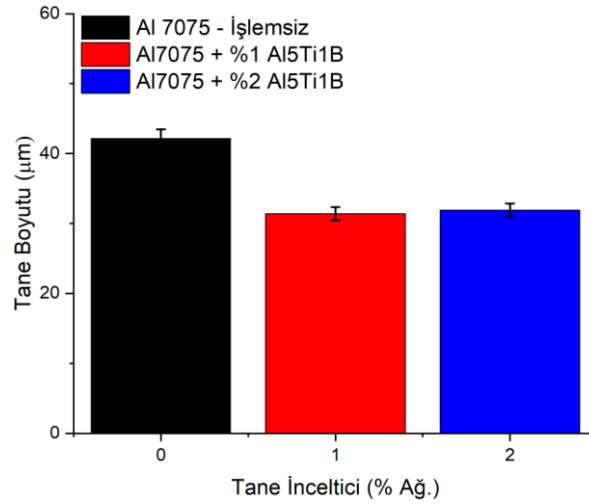
Şekil 6'da Al7075 alaşımı ve bu alaşıma ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al5Ti1B tane inceltici ilave edilerek kokil kalıba gerçekleştirilen döküm sonrası elde edilen numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6(a)'da verilen Al7075 alaşımının döküm mikroyapısının dentritik bir katılaşma sergilediği ve genel olarak kaba dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu alaşıma ağırlıkça %1 oranında Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilmesi ile mikroyapının dentritik bir yapıdan eş eksenliye geçiş oluşturduğu ve tanelerin nispeten daha köşeli bir hal aldığı söylenebilir. Alaşıma ilave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %2 oranına artırılması ile birlikte %1 oranında tane inceltici ilave edilen numuneye benzer bir mikroyapı oluştuğu gözlenmektedir. Al5Ti1B master alaşımının tane inceltme mekanizması üzerine çeşitli teoriler bulunmakla birlikte en kabul gören teori çekirdeklenme teorisidir. Tane inceltici ilavesi sonrası eriyik Al içerisinde $TiAl_3$, AlB_2 ve TiB_2 gibi çözünebilir veya çözünemeyen intermetalik yapılar oluşmaktadır [23]. Bu intermetalik yapılar eriyik içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezi oluşturmakta ve yapının daha ince taneli olmasını sağlamaktadır.



Şekil 6. (a) Al7075 alaşımına ait, (b) %1 ve (c) %2 tane inceltici ilave edilmiş alaşımlara ait optik mikroskop görüntüleri

Şekil 7'de lineer intercept metodu kullanılarak ölçülen tane boyutlarına ait sonuçlar incelendiğinde Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile tane boyutunun azaldığı anlaşılmaktadır. Gerçekleştirilen ölçüm sonucu tane inceltici ilave edilmeyen döküm numunesinin tane boyutu $\sim 42 \mu m$ olarak ölçülmüştür. Al7075 alüminyum alaşımına %1 (ağ.) tane inceltici ilave edilmesi ile tane boyutu yaklaşık ~ 24 azalarak

~31 μm seviyesine düşmüştür. İlave edilen tane inceltici miktarının %2 (ağ.) çıkarılması ile referans numuneye göre tane boyutu ~%23 oranında azalarak ~32 μm seviyesine düşmüştür. Al-5Ti-1B master alaşımın Al7075 alaşımının tane boyutunu azaltmada etkili olduğu görülmektedir. Al7075 alaşımına farklı oranlarda Al-5Ti-1B ilave eden Li ve arkadaşları [24] alaşıma ilave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %0.1 oranında tane boyutunda önemli bir azalmaya neden olduğunu fakat, tane inceltici miktarının artırılması ile tane boyutunda önemli bir azalma olmadığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, İzçankurtaran ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada 6082 alaşımına ilave ettikleri farklı oranlardaki Al-5Ti-1B tane incelticinin alaşımın ısı işlem sonrası tane boyutundaki değişimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonunda tane inceltici ilavesinin alaşımın tane boyutunu azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, ilave edilen tane inceltici miktarının belirli bir seviyenin üzerine çıkması ile tane boyutunda azalma olmadığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [26,27]. Bu durum, artan tane inceltici ilavesinin alaşımda tane inceltme için heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranmak yerine kümelenmesi veya çözünerek katı eriyik fazlar oluşturması şeklinde açıklanabilir. Dolayısıyla bu çalışmada ağırlıkça %2 tane boyutu ilavesinin alaşımın tane boyutunu azaltmak için etkili sınırın dışında kaldığı söylenebilir.

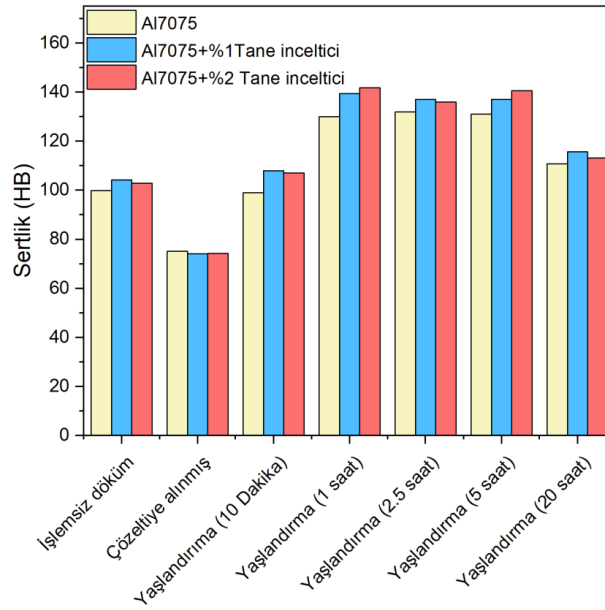


Şekil 7. Tane boyutunun tane inceltici miktarına bağlı değişimi

3.2. Sertlik Testi

Şekil 8’de verilen grafikte Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane incelticinin döküm hali, çözeltiye alınmış durumu ve çökeltme sertleşmesi işlemine tabi tutulmuş durumlarının sertlik sonuçları görülmektedir. Al7075 alaşımına ait sertlik değeri ~100 HB iken bu alaşıma ilave edilen ağırlıkça %1 oranında tane inceltici ile alaşımın sertliğinin ~%5 arttığı tespit edilmiştir. İlave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %2’ye çıkarılması ile sertlik değerinin başlangıç duruma daha az arttığı görülmektedir. Şekil 7’deki grafikte Al7075 alaşımına ilave edilen tane inceltici ile alaşımın tane boyutunda bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Fakat artan tane inceltici ilavesi ile tane boyutunda azalma olmadığı ve ağırlıkça %1 oranında tane inceltici içeren alaşıma benzer bir değerde kaldığı anlaşılmaktadır. Tane inceltme işlemi sonucu hem tane boyutu azalmakta hem de ilave edilen tane incelticinin katı eriyik veya intermetalik fazlar oluşturma ihtimali artarak alaşımın sertliğini artırabileceği benzer çalışmalarda rapor edilmiştir [28,29]. Bununla birlikte tane inceltici ilavesi sonucu sertliğin artmasına neden olan ana mekanizma, düşük tane boyutunun dislokasyon hareketini engelleyerek alaşımı daha sert ve mukavemetli hale getirmesidir [8]. Tane inceltici ilave edilen ve ilave edilmeyen alaşımların çözeltiye alma işlemi sonrası sertliklerinde bir azalma meydana geldiği ve sertlik değerlerinin ~70 HB seviyesine düştüğü görülmektedir. Çözeltiye alma işlemi sonrası çökelti fazları matris içerisinde çözünerek sertliğin azalmasına neden olduğu bilinmektedir [30]. Bununla birlikte çözeltiye alınan numunelerde tane inceltici ilavesinin sertliğe olan etkisi görülmemiştir. Alaşımın 10 dakika süre ile yaşlandırılması sonucu Al7075 alaşımın döküm halinin sertliğinde bir değişiklik gözlenmemişken, ağırlıkça %1 ve %2 oranında tane inceltici ilave edilen numunenin sertliğinde bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Yaşlandırma süresinin 1 saate çıkarılması ile sertlik

değerinin artarak Al7075 alaşımının döküm haline göre ~%30 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Yine aynı yaşlandırma süresi için tane inceltici ilave edilen numunelerin sertlik değeri başlangıç duruma göre daha yüksek çıkmaktadır. Yaşlandırma süresinin 2.5 ve 5 saat olduğu numunelerde sertlik değerinde 1 saat süre ile yaşlandırılan numuneye göre önemli bir değişim gözlemlenmezken, bu numunelerde de tane inceltici ilavesinin yaşlandırma sonrası alaşımın sertliğini kısmen artırdığı tespit edilmiştir. Çözeltiyeye alma işlemi sonucu aşırı doymuş hale getirilen Al7075 alaşımının yapay olarak yaşlandırılması ile GP zonları adı verilen çökelti partikülleri çeşitli kademelerden geçerek büyümektedir. Bu esnada alt taneleri oluşturan bu partiküller tane inceltme işlemine benzer şekilde dislokasyon hareketini engellemekte ve Orawan ve Hall-Patch teorilerine belirtildiği üzere sertliğin artmasına neden olmaktadır [31–33]. Yaşlandırma süresinin 20 saate çıkarılması ile alaşımın sertliğinde bir azalma meydana geldiği ve 110 HB sertlik değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Yani Al7075 alaşımının 20 saat süre ile 200 °C’de gerçekleştirilen çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi için aşırı yaşlanma bölgesine geçildiği söylenebilir. Tane inceltici ilavesinin aşırı yaşlanma bölgesinde sertliğe olan etkisi ise eser miktarda bir sertlik artışı olarak görülmüştür.

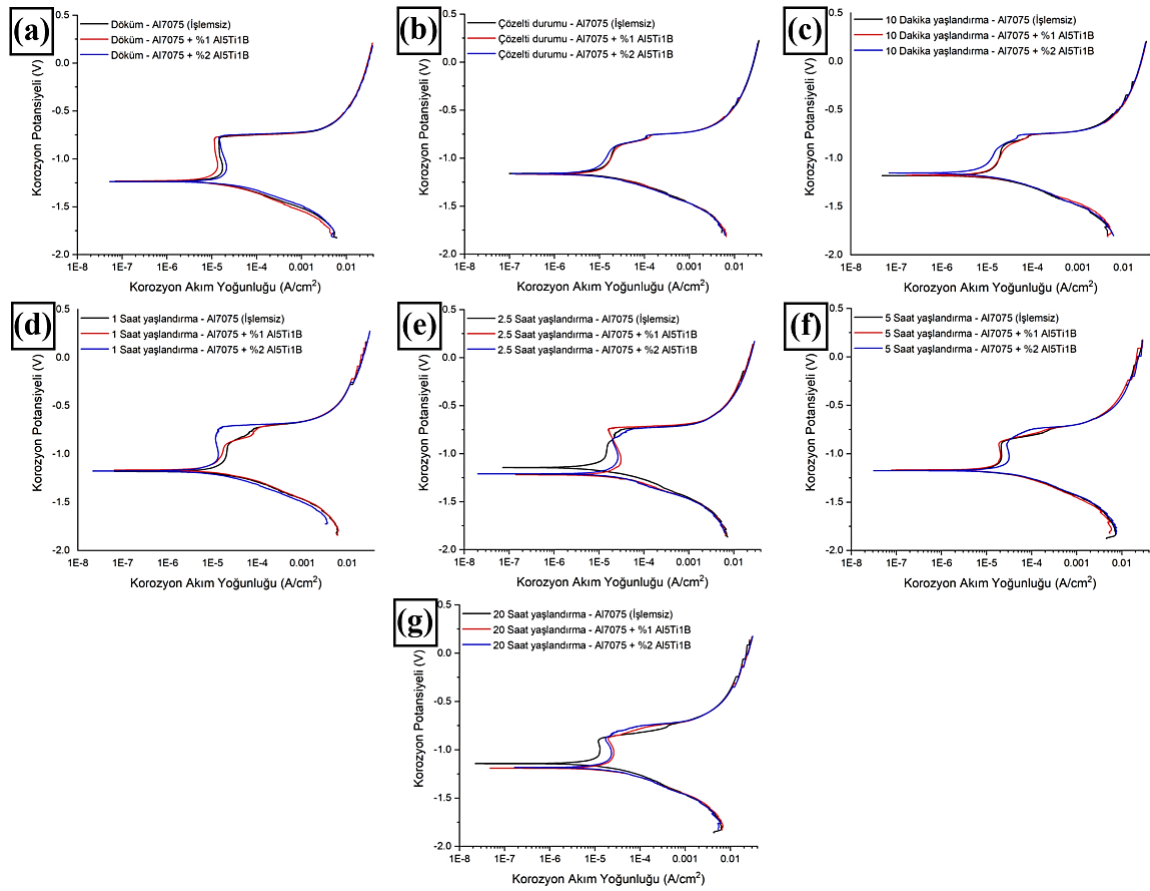


Şekil 8. Sertliğin tane inceltme ve çökeltme sertleşmesine bağlı değişimi

3.3. Korozyon Dayanımı

Şekil 9’da korozyon testi sonucu elde edilen Tafel eğrileri görülmektedir. Tafel eğrilerine göre Al7075 alaşımına 200 °C’de farklı sürelerde gerçekleştirilen çökeltme sertleşmesinin Tafel eğrilerinde eser miktarda bir değişime neden olduğu anlaşılmaktadır. Grafiklerde alaşımlara uygulanan ısıl işlem sonucu korozyon potansiyellerinde pozitif yönde bir kayma olduğu yani alaşımı daha soy hale getirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kinetik açıdan korozyon davranışının değerlendirilmesinde önemli bir veri olan akım yoğunluğu değerlerinin genel olarak ısıl işlem süresinin 1, 2.5 ve 5 saat olduğu yani yaşlanmanın tepe noktalarında artarak alaşımı korozyona karşı daha dirençsiz hale getirdiği gözlenmektedir (Tablo 2). Literatürde çökeltme sertleşmesinin alaşımların korozyon direncini negatif yönde etkilediği belirtilmiştir [34]. Yine çökeltme sertleşmesi uygulanan Al7075 alaşımının çukurcuk korozyonu, taneler arası korozyon ve pullanma (exfoliation) korozyonuna karşı hassas hale geldiği bilinmektedir [35,36]. Özellikle bölgesel olarak görülen bu korozyonlar intermetalik fazlar ve matris arasında oluşan galvanik çift neticesinde oluşmaktadır. Al7075 alaşımı içerisinde Fe ve Cu içeren intermetalikler matrise göre katodik bir davranış sergiler ve matrisin çözünmesine katkı sağlarken Zn ve Mg açısından zengin intermetalikler matrise göre anodik bir davranış sergileyerek tercihli olarak çözünürler [35,37]. Örneğin, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında görülen ve bir tane sınırı fazı olan η (MgZn₂) matris içerisinde anot olarak davranarak korozif çözelti içerisinde tercihli olarak saldırıya uğrar. Ancak bu alaşımlara ilave edilen Cu elementinin Zn ve Mg

elementlerine göre elektrokimyasal potansiyellerinin daha yüksek olması sebebiyle tane sınırı fazlarını daha soy tarafa kaydırır. Tane sınırlarında yer alan bakırın sürekli olarak çözünmesi bu fazlardaki anodik çözünmeyi artırır ve taneler arası korozyon hassasiyeti artar. Bu sebeple Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında yaşlanmanın tepe noktasında taneler arası korozyon hassasiyeti daha fazladır [38–40]. Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının klorür ve benzer çözeltiler içerisindeki tane sınırı boyunca oluşan korozyonunun azaltılması alaşımların ısıl işlem parametrelerine önemli seviyede bağlıdır ve parametrelerin optimize edilmesi ile korozyon hassasiyeti azaltılabilir [38]. Öte yandan alaşımların döküm durumuna 20 saat süre ile uygulanan ısıl işleminin yani aşırı yaşlanma bölgesinde gerçekleştirilen çökelme sertleşmesinin korozyon direncini alaşımların döküm durumuna göre artırdığı görülmektedir. Literatürde aşırı yaşlanma ısıl işleminin alaşımların korozyon direncini artırdığı rapor edilmiştir [41]. Bu bakımdan korozyon test sonuçlarının Al 7075 alaşımlarının döküm hali için literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Potansiyodinamik polarizasyon testi sonucu elde edilen Tafel eğrileri; (a) Döküm işlemi sonrası elde edilen numunler, (b) Çözeltiye alınmış numuneler, (c) 10 dakika, (d) 1 saat, (e) 2.5 saat, (f) 5 saat, (g) 20 saat süre ile ısıl işlem görmüş numuneler

Şekil 9’da verilen Tafel eğrilerinde tane inceltici ilave edilen numunelerin korozyon potansiyellerinin alaşımların döküm işlemi sonrasındaki durumlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Yine bu numunelere uygulanan ısıl işlem sonrası ölçülen korozyon potansiyellerinin alaşımların döküm hali ile benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte akım yoğunluğu değerlerinin doğrusal bir davranış sergilemediği görülmektedir. Fakat genel olarak çözeltiye alınmış, 10 dakika ve 1 saat süre ile yaşlandırılan numunelerde alaşıma ilave edilen tane incelticinin korozyon direncini artırdığı fakat ısıl işlem süresinin artması ile korozyon direncinin alaşımların döküm hali lehine bir davranış sergilediği görülmektedir. Literatürde genel olarak daha ince tane yapısına sahip metallerin daha kaba taneli durumuna göre korozyon direncinin daha yüksek olduğu rapor edilmektedir [42,43]. Öyle ki Ralston ve arkadaşları [44] tarafından yapılan çalışmada

Hall-Patch eşitliğine benzer bir eşitlik türetilerek korozyon direncinin azalan tane boyutu ile arttığı rapor edilmiştir. Öte yandan bunun aksini ifade eden çalışmalarda mevcuttur. Fakat tane inceltme işleminin eriyik içerisinde ilave edilen Al-5Ti-1B gibi bir master alaşım ile gerçekleştirildiği proseslerde korozyon direnci değişkenlik göstermektedir. Bunun sebebi tane inceltici ilavesi ile eser miktarda da olsa alaşımın kimyasal kompozisyonunun değişmesidir. Örneğin Mahdy ve Sadawy yaptıkları çalışmada Al6061 alaşımına ilave edilen tane incelticinin alaşımın korozyon direncini artırdığı fakat ilave miktarının belli bir seviyenin üzerine çıkarılması ile korozyon direncini azaltacak yönde hareket ettiğini belirtmişlerdir [45]. Alaşım içerisinde eser miktarda bile olsa ilave edilen tane inceltici alaşım içerisinde yeni intermetalikliklerin oluşumunu teşvik etmektedir. Literatürde Al7075 mikroyapısı içerisinde oluşan intermetaliklikler ile matris faz arasında oluşan güçlü potansiyel farkın korozyon üzerinde etkili olduğu, intermetaliklikler üzerinde başlayan korozyon sonucu bölgesel olarak matris fazda çözümlerin görülebileceği ve devamında tanelerarası korozyon ve pullanmanın meydana gelebileceği belirtilmiştir [46]. Bu sebeple düşük yaşlanma sürelerinde tane boyutunun alaşımın korozyonu üzerinde etkili olduğu fakat ilerleyen yaşlanma sürelerinde alaşım içerisinde ilave edilen tane incelticinin çökelti fazları içerisinde çözünerek fazların korozyon davranışını etkileyebileceği söylenebilir.

Tablo 2. Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon parametreleri

| Numune Grubu | Isıl İşlem Durumu | E _{kor} (mV) | I _{kor} (µA/cm ²) | β _a (mV) | β _c (mV) | K _r (mpy) |
|--------------------------------|---------------------|-----------------------|--|---------------------|---------------------|----------------------|
| Döküm Hali | Al7075 (Döküm hali) | -1235 | 12.616 | 844.4 | 132.3 | 7.451 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1229 | 8.592 | 662.6 | 118.9 | 5.074 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1240 | 11.144 | 679.1 | 98.7 | 6.581 |
| Çözelti | Al7075 | -1160 | 10.639 | 431.9 | 105.6 | 6.283 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1168 | 11.881 | 538.4 | 106.5 | 7.017 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1163 | 8.248 | 495.6 | 101.6 | 4.871 |
| 10 Dakika Süre İle Yaşlandırma | Al7075 | -1183 | 14.925 | 890.5 | 126.7 | 8.815 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1178 | 13.086 | 649.8 | 113.7 | 2.282 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1152 | 8.733 | 571.9 | 122.2 | 5.157 |
| 30 Dakika Süre İle Yaşlandırma | Al7075 | -1183 | 13.884 | 556.1 | 109.8 | 8.2 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1163 | 11.768 | 636.9 | 111.4 | 6.968 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1178 | 10.294 | 637.1 | 125.8 | 6.079 |
| 1 Saat Süre İle Yaşlandırma | Al7075 | 1137 | 11.526 | 586.3 | 123.7 | 6.807 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | 1219 | 23.24 | 525.2 | 117.4 | 13.73 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1209 | 22.463 | 871.7 | 151.2 | 13.267 |
| 5 Saat Süre İle Yaşlandırma | Al7075 | -1170 | 16.736 | 497.6 | 103.6 | 9.889 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1168 | 16.235 | 585.3 | 106.8 | 9.588 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1173 | 26.377 | 627.1 | 129.1 | 15.578 |
| 20 Saat Süre İle Yaşlandırma | Al7075 | -1142 | 10.431 | 521.7 | 103 | 6.16 |
| | Al7075 + %1 Al5Ti1B | -1193 | 19.694 | 539.3 | 113.2 | 11.631 |
| | Al7075 + %2 Al5Ti1B | -1183 | 19.562 | 664.9 | 122.5 | 11.553 |

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane incelticinin alaşımın yaşlanma üzerindeki etkisi mikroyapısal, sertlik testi ve korozyon testi gerçekleştirilerek incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir;

- 1) Al7075 alaşımına ilave edilen tane inceltici ile alaşımın mikroyapısında yer alan intermetaliklik fazların incelendiği ve mikroyapının daha homojen bir hal aldığı tespit edilmiştir. İlave edilen tane inceltici ile dentritik bir katılaşma sergileyen başlangıç mikroyapısının tane inceltici ilavesi ile eş eksenli bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir.

- 2) Alaşıma ilave edilen ağırlıkça %1 oranında tane inceltici ile tane boyutunda %24 oranında bir tane incilmesi olduğu tespit edilmiştir. Fakat artan tane inceltici ilavesi ile tane boyutunda meydana gelen azalma değişmemiş ve sabit kalmıştır.
- 3) Al7075 alaşımına 200 °C’de uygulanan çökeltme sertleşmesi sonucu ölçülen sertlik değerlerine göre 1 ve 5 saat aralığının yaşlanmanın tepe noktası olduğu söylenebilir. Alaşıma ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile alaşımın hem döküm halinin hem de çökeltme sertleşmesi uygulanan durumunun sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- 4) Gerçekleştirilen korozyon testi sonucu ısıl işlemin alaşımın korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Bununla birlikte tane inceltici ilavesinin korozyon direnci düşük yaşlandırma süreleri için pozitif yönde etkilerken, yaşlanma sürelerinin artması ile korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi BAP 2021-73338635-01 nolu ve BAP 2022-73338635-01 nolu projeleri ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Dursun, C. Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Mater. Des.* 56 (2014) 862–871. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- [2] M.C. Reboul, B. Baroux, Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys, *Mater. Corros.* 62 (2011) 215–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/maco.201005650>.
- [3] J. HIRSCH, Recent development in aluminium for automotive applications, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 24 (2014) 1995–2002. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63305-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63305-7).
- [4] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V Kutumbarao, R.J.H. Wanhill, Aluminium Alloys for Aerospace Applications BT - Aerospace Materials and Material Technologies : Volume 1: Aerospace Materials, in: N.E. Prasad, R.J.H. Wanhill (Eds.), Springer Singapore, Singapore, 2017: pp. 29–52. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_2.
- [5] M.A. Wahid, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint, *Mar. Syst. Ocean Technol.* 15 (2020) 70–80. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>.
- [6] D.S. MacKenzie, Metallurgy of Heat Treatable Aluminum Alloys, *Heat Treat. Nonferrous Alloy.* 4E (2016) 0. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04e.a0006287>.
- [7] L. Hua, X. Hu, X. Han, Microstructure evolution of annealed 7075 aluminum alloy and its influence on room-temperature plasticity, *Mater. Des.* 196 (2020) 109192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109192>.
- [8] A.D. Isadare, B. Aremo, M.O. Adeoye, O.J. Olawale, M.D. Shittu, Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy, *Mater. Res.* 16 (2013) 190–194. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000167>.
- [9] M.N. Efvina Efvanz, H.J. Kong, C.K. Kok, Review: Effect of Alloying Element on Al-Si Alloys, *Adv. Mater. Res.* 845 (2014) 355–359. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.845.355>.
- [10] H.C. Fang, H. Chao, K.H. Chen, Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys, *Mater. Sci. Eng. A.* 610 (2014) 10–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.021>.
- [11] K. Chen, H. Liu, Z. Zhang, S. Li, R.I. Todd, The improvement of constituent dissolution and mechanical properties of 7055 aluminum alloy by stepped heat treatments, *J. Mater. Process.*

- Technol. 142 (2003) 190–196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00597-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00597-1).
- [12] M. Çolak, A. İbrahim, Investigation of Wear Properties of Grain Refined and Modified A319 Aluminum Alloy Produced with Sand and Permanent Mold, 7 (2018) 134–137.
- [13] M. Uludağ, Experimental and Statistical Analysis of Effect of Si Modification and Grain Refinement on Tensile Properties of A356 Alloy, J. Polytech. 24 (2021) 1409–1417. <https://doi.org/https://doi.org/10.2339/politeknik.707109>.
- [14] M. Uludağ, M. Kocabaş, D. Dışplnar, R. Çetin, N. Cansever, Effect of Sr and Ti addition on the corrosion behaviour of Al-7Si-0.3Mg alloy, Arch. Foundry Eng. 17 (2017) 125–130. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0063>.
- [15] M. Çolak, R. Kayıkçı, Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme, SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg. 13 (2009) 11–17.
- [16] İ. Arslan, E. Gavgalı, M. Çolak, Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Acad. Platf. J. Eng. Sci. 7 (2019) 237–244. <https://doi.org/10.21541/apjes.424920>.
- [17] E. Kocaman, S. Şirin, D. Dispınar, Artificial Neural Network Modeling of Grain Refinement Performance in AlSi10Mg Alloy, Int. J. Met. (2020). <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00472-9>.
- [18] R. Kayıkci, M. Colak, S. Sirin, E. Kocaman, N. Akar, Determination of the critical fraction of solid during the solidification of a PM-cast aluminium alloy, Mater. Tehnol. 49 (2015) 797–800. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.266>.
- [19] K.T. Kashyap, T. Chandrashekar, Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys, Bull. Mater. Sci. 24 (2001) 345–353. <https://doi.org/10.1007/BF02708630>.
- [20] M. Baruah, A. Borah, Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review, Int. J. Mater. Sci. 1 (2020) 40–48. <https://doi.org/10.22271/27078221.2020.v1.i1a.10>.
- [21] G. Sha, K. O'Reilly, B. Cantor, R. Hamerton, J. Worth, Effect of Grain Refiner on Intermetallic Phase Formation in Directional Solidification of 6xxx Series Wrought Al Alloys, Mater. Sci. Forum. 331–337 (2000) 253–258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.253>.
- [22] A. Lui, P.S. Grant, I.C. Stone, K.A.Q. O'Reilly, The Role of Grain Refiner in the Nucleation of AlFeSi Intermetallic Phases During Solidification of a 6xxx Aluminum Alloy, Metall. Mater. Trans. A. 50 (2019) 5242–5252. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05447-y>.
- [23] G.K. Sigworth, T.A. Kuhn, Grain refinement of aluminum casting alloys, Int. J. Met. 1 (2007) 31–40. <https://doi.org/10.1361/asmhba0005302>.
- [24] T. Li, S.C. Wang, K.H. Zheng, Effect of Al-5Ti-1B grain refiner on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy, Mater. Sci. Forum. 817 (2015) 331–336. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.817.331>.
- [25] D. Izcankurtaran, B. Tunca, G. Karatay, Investigation of the Effect of Grain Refinement on the Mechanical Properties of 6082 Aluminium Alloy, Open J. Appl. Sci. 11 (2021) 699–706. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2021.116051>.
- [26] A.P. Hekimoğlu, Y.E. Turan, İ.İ. İsmailoğlu, M.E. Akyol, Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy Bor ile yapılan tane inceltmenin Al-30Zn alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi Effect of grain refinement with boron on the microstructur, 1 (2019) 523–534. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416512>.

- [27] M. Easton, D. StJohn, An analysis of the relationship between grain size, solute content, and the potency and number density of nucleant particles, *Metall. Mater. Trans. A.* 36 (2005) 1911–1920. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0054-y>.
- [28] A.B. Pattnaik, S. Das, B.B. Jha, N. Prasanth, Effect of Al–5Ti–1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy, *J. Mater. Res. Technol.* 4 (2015) 171–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.017>.
- [29] K. Kaneko, T. Hata, T. Tokunaga, Z. Horita, Fabrication and Characterization of Supersaturated Al–Mg Alloys by Severe Plastic Deformation and Their Mechanical Properties, *Mater. Trans.* 50 (2009) 76–81. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MD200813>.
- [30] B.-R. Jin, D.-W. Ha, C.-Y. Jeong, Effect of Solution Treatment on the Hardness and Tensile Properties of Al–Mg–Si Alloys for Automotive Chassis, *Mater. Trans.* 60 (2019) 815–823. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018368>.
- [31] E. Hornbogen, Hundred years of precipitation hardening, *J. Light Met.* 1 (2001) 127–132. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(01\)00006-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1471-5317(01)00006-2).
- [32] X. Xie, J. Shen, L. Cheng, Y. Li, Y. Pu, Effects of nano-particles strengthening activating flux on the microstructures and mechanical properties of TIG welded AZ31 magnesium alloy joints, *Mater. Des.* 81 (2015) 31–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.024>.
- [33] J. Deng, J. Shen, H. Li, H. Chen, F. Xie, Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Sc-contained Al-7075 alloys after solution-Aging treatment, *Mater. Res. Express.* 7 (2020). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abb4fa>.
- [34] S.M. Mohammed, S.M. Mahdi, Corrosion behavior of aluminum alloys 2024 and 6061 in rainwater, *J. Phys. Conf. Ser.* 1973 (2021) 39–48. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012085>.
- [35] R.P. Wei, C.-M. Liao, M. Gao, A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys, *Metall. Mater. Trans. A.* 29 (1998) 1153–1160. <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0241-8>.
- [36] P.S. Pao, C.R. Feng, S.J. Gill, Corrosion Fatigue Crack Initiation in Aluminum Alloys 7075 and 7050, *Corrosion.* 56 (2000) 1022–1031. <https://doi.org/10.5006/1.3294379>.
- [37] C.M. Liao, R.P. Wei, Galvanic coupling of model alloys to aluminum - a foundation for understanding particle-induced pitting in aluminum alloys, *Electrochim. Acta.* 45 (1999) 881–888. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(99\)00299-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(99)00299-6).
- [38] Y. Wang, L. Cao, X. Wu, X. Tong, B. Liao, G. Huang, Z. Wang, Effect of retrogression treatments on microstructure, hardness and corrosion behaviors of aluminum alloy 7085, *J. Alloys Compd.* 814 (2020) 152264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152264>.
- [39] X. Peng, Q. Guo, X. Liang, Y. Deng, Y. Gu, G. Xu, Z. Yin, Mechanical properties, corrosion behavior and microstructures of a non-isothermal ageing treated Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 688 (2017) 146–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.086>.
- [40] S. Li, H. Dong, L. Shi, P. Li, F. Ye, Corrosion behavior and mechanical properties of Al-Zn-Mg aluminum alloy weld, *Corros. Sci.* 123 (2017) 243–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.007>.
- [41] F. Song, X. Zhang, S. Liu, Q. Tan, D. Li, The effect of quench rate and overageing temper on the corrosion behaviour of AA7050, *Corros. Sci.* 78 (2014) 276–286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.010>.

- [42] K.D. Ralston, N. Birbilis, Effect of grain size on corrosion: A review, *Corrosion*. 66 (2010) 0750051–07500513. <https://doi.org/10.5006/1.3462912>.
- [43] P. Wang, L. Ma, X. Cheng, X. Li, Influence of grain refinement on the corrosion behavior of metallic materials: A review, *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 28 (2021) 1112–1126. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2308-0>.
- [44] K.D. Ralston, N. Birbilis, C.H.J. Davies, Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals, *Scr. Mater.* 63 (2010) 1201–1204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.035>.
- [45] M. Sadawy, A. Mahdy, Effect of Grain Refiner Al–5Ti–1B on the Corrosion and Electrochemical Behavior of Al-6061 in 3.5wt. % NaCl Solution, *Metall.* (2013) 397–401.
- [46] F. Andreatta, H. Terryn, J.H.W. de Wit, Corrosion behaviour of different tempers of AA7075 aluminium alloy, *Electrochim. Acta.* 49 (2004) 2851–2862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.046>.

Development of Battery Management System and Review of CANBUS Data Traffic

Muhammet Ahmet KOYUNCU¹ , Kubilay TAŞDELEN² 

¹Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0003-1769-0725, Merkez/ISPARTA

²Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0001-5664-3898, Merkez/ISPARTA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 5.08.2022
Revision: 24.08.2022
Accepted: 23.09.2022

Highlights

Control Area Network
Battery Management
Systems
Bus load analysis.

Keywords

Control Area Network
Battery Management
Systems
Bus load analysis

In this study, the change of the load on the line with the change of line speed of the CAN protocol, which is widely used in electric vehicles, is shown. There are three different nodes on the system and they are in constant communication with each other. The tests were performed at 125kbit/s, 500kbit/s and 1000kbit/s speeds.

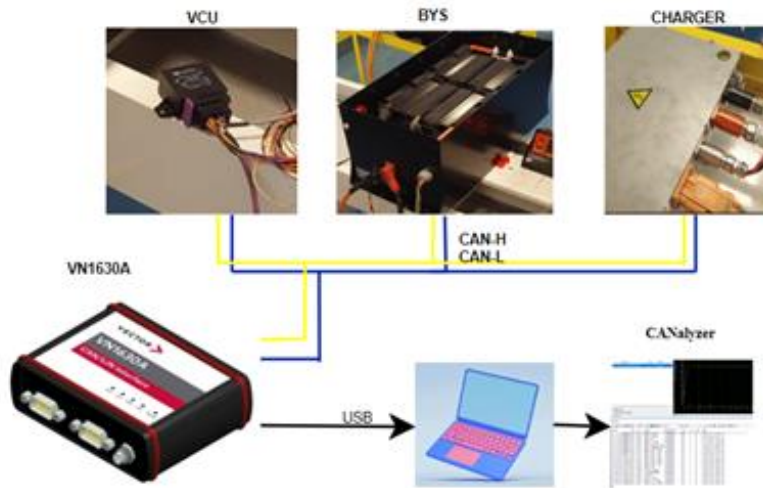


Figure A. Experimental setup block diagram

Purpose: The general aim of this study is, line load is a very important issue in CAN communication. If the load is exceeded, the system becomes inoperable and the system crashes. In order to prevent this, the system requirements should be calculated beforehand and the speed of the CAN line should be selected accordingly.

Theory and Methods: There are three nodes in the prepared experimental setup. These; The BMS is the VCU and the charger. These three nodes communicate with each other over the CAN line. Calculation method, simulation and CANalyzer program were used to find the system load.

Results: The results of the experimental setup and the calculation and simulation results were compared with each other. According to the data obtained from the experimental setup, the load of the CAN line was found to be 1.97% in the tests performed at 1000 kbit/s speed and 19.58% in the tests performed at 125 kbit/s speed. The results from the tests are all acceptable values for the CAN line.

Conclusion: While calculating the line load in the CAN protocol, after the system requirements are determined beforehand, the calculation method or simulation helps us to find the line load that will occur on the real system.

GU J Sci, Part C, 9(2): 171-181 (2021)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi
PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

Development of Battery Management System and Review of CANBUS Data Traffic

Muhammet Ahmet KOYUNCU¹ , Kubilay TAŞDELEN² 

¹İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0003-1769-0725, Merkez/İSPARTA

²İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ORCID:0000-0001-5664-3898, Merkez/İSPARTA

Abstract

In these days, the usage and production of electric vehicles has been increasing. In parallel with this increase, electric vehicle technologies are developing constantly. With the increase in the usage of electric vehicles, the importance of BMS (Battery Management System), which controls the charge and discharge cycles of batteries, is increasing and researches are being carried out to increase their efficiency. Batteries with high energy density used in electric vehicles need to be kept under constant control. A large number of cells are used to obtain the high voltage and capacity required by electric vehicles. Each cell needs a battery management system to keep it under control. CAN (Controller Area Network) is used in BMS communication with the vehicle. In this study, the data traffic on the CAN line of the BMS used in today's electric vehicles has been analyzed. In this analysis, instant data of the battery pack is sent over the CAN line. The system includes BMS, charger and VCU (Vehicle Control Unit). An experimental setup with BMS, VCU and charger nodes was prepared and line load calculation was made on this experimental setup. Three different methods were used in the line load calculation process and the relationship of these methods with each other was compared. Different CAN speeds were used in the test stages and line load analysis was performed by changing the message sending frequencies. According to the data obtained from the experimental setup, the load of the CAN line was found to be 1.97% in the tests performed at 1000 kbit/s speed and 19.58% in the tests performed at 125 kbit/s speed. The results from the tests are all acceptable values for the CAN line..

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 5.08.2022
Düzeltilme: 24.08.2022
Kabul: 23.09.2022

Keywords

Control Area Network
Battery Management
Systems
Bus load analysis

Anahtar Kelimeler

Denetleyici Alan Ağı
Batarya Yönetim Sistemi
Hat yükü analizi

Akü Yönetim Sisteminin Geliştirilmesi ve CANBUS Veri Trafikinin İncelenmesi

Öz

Son zamanlarda elektrikli araçların kullanımı ve üretimi artmaktadır. Bu artışla paralel olarak elektrikli araç teknolojileri sürekli olarak gelişmektedir. Elektrikli araçların kullanımlarının artmasıyla bataryaların şarj ve deşarj döngülerini kontrol eden BYS (Batarya Yönetim Sisteminin) nin de önemi artmakta ve verimlerinin artırılması için araştırmalar yapılmaktadır. Elektrikli araçlarda kullanılan enerji yoğunluğu yüksek bataryaların, sürekli olarak kontrol altında tutulmaları gerekmektedir. Elektrikli araçların ihtiyaç duyduğu yüksek gerilim ve kapasitenin elde edilmesi için çok fazla sayıda hücre kullanılmaktadır. Her bir hücrenin kontrol altında tutulması için batarya yönetim sistemine ihtiyacı vardır. BYS, araç ile haberleşmesinde CAN (Controller Area Network- Denetleyici Alan Ağı) kullanılır. Bu çalışmada, günümüz elektrikli araçlarında kullanılan BYS'nin CAN hattındaki veri trafiğinin analizi yapılmıştır. Yapılan bu analizde batarya paketinin anlık verileri CAN hattı üzerinden gönderilmektedir. Sistem içerisinde BYS, şarj cihazı ve VCU (Vehicle Control Unit- Araç Kontrol Ünitesi) bulunmaktadır. BYS, VCU ve şarj cihazı düğümlerinin bulunduğu bir deney düzeneği hazırlanmıştır ve bu deney düzeneği üzerinde hat yükü hesaplaması yapılmıştır. Hat yükü hesaplama işleminde üç farklı yöntem kullanılmıştır ve bu yöntemlerin birbiri ile ilişkisi karşılaştırılmıştır. Test aşamalarında farklı CAN hızları kullanılmıştır ve mesaj gönderme sıklıkları değiştirilerek hat yükü analizi yapılmıştır. Hazırlanan deney düzeneğinden elde edilen verilere göre CAN hattının yükü, 1000 kbit/s hızında yapılan testlerde %1.97, 125 kbit/s hızında yapılan testlerde ise %19.58 arasında olduğu görülmüştür. Yapılan testlerden çıkan sonuçların hepsi CAN hattı için kabul edilebilir değerlerdir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrikli araçların hareket edebilmek için ihtiyaç duyduğu güç elektrik motorları tarafından sağlanmaktadır. Elektrik motorları, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirirler bu işlemi gerçekleştirirken ki gerekli olan enerjiyi batarya paketlerinden alırlar. Bundan dolayı elektrikli araçlarda kullanılan piller araç için çok büyük önem taşımaktadır. BYS, şarj edilebilir bir batarya paketinin veya hücrelerinin akım, gerilim, sıcaklık, yaşam döngüsü, kapasitesi gibi fiziksel parametrelerini izleyen ve bu değerleri kullanıcıya genelde CAN hattı üzerinden raporlayan cihazlardır.

Denetleyici Alan Ağı protokolü 1983 yılında otomotiv sektöründe kullanılmak üzere Robert Bosch tarafından geliştirilmeye başlanmıştır ve resmi olarak 1986 yılında kullanılmaya başlanmıştır [1,2,3]. CAN protokolü çok yöneticili bir yapısı, hata algılama mekanizması bulunan hızlı ve uzun mesafelerde veri alışverişi yapabilen bir iletişim protokolüdür [2,4,5,6].

CAN standart protokolü, OSI (Open System Interconnect – Açık Sistem Bağlantısı) referans modelinin 1. ve 2. katmanlarına karşılık gelmektedir. Her ne kadar başlangıçta yalnızca otomotiv uygulamaları için geliştirilmiş olsa da küçük boyut, düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve yüksek hız gibi özelliklerinden dolayı birçok dağıtık endüstriyel kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Güvenliğin çok önemli olduğu gerçek zamanlı uygulamalarda da kullanılır. Çünkü yapılan istatistiksel olasılık hesapları doğrultusunda bir asırda bir tane tespit edilemeyen mesaj hatası yapabileceği tespit edilmiştir [1,7,8,9,10].

CAN haberleşme protokolünde gönderilen ve alınan mesajlardan dolayı düğümler, hatta belirli bir yük bindirirler. CAN veri yolunun belirli bir kapasitesi vardır. Bu kapasite bir saniyede kaç bitlik bir veri transferi yapabileceğine göre ölçüsüdür. Düğümden gönderilen bir mesajın kaç bitlik veri taşıdığı ve ilgili çerçevenin kaç bitten oluştuğu belli olduğu için bu yoğunluk hesaplanabilir [11].

CAN hattının yoğunluğu belirli bir değer üzerine çıkarsa düşük öncelikli mesajlar sürekli baskılanacağından dolayı veri yoluna mesaj gönderemezler. Böyle bir durum ise CAN protokolünün güvenilirliğini düşürecektir. Hat yoğunluğunu hesaplamak için düğümdeki her bir mesajın hatta oluşturduğu yükü ayrı olarak hesaplamak gereklidir [12]. Daha sonra hattaki yoğunluk bu değerlerin toplamına eşit olacaktır. Veri yolundaki bir adet mesajı X tane düğümün alacağını düşündüğümüzde tek bir mesajın hatta oluşturduğu yoğunluk mesajın basılması ve dinleyen her bir düğümün buna vereceği yanıt bir araya gelerek hesaplanır.[13]

CAN hattındaki yoğunluk hesabı veri iletişiminin güvenliği açısından oldukça önemlidir. Bununla ilgili yapılan bir çalışmada Rohler, traktörler için gerçek zamanlı bir CAN hattı veri analizi yapmıştır. Analiz programı olarak Kvaser CanKing, Vector CANalyzer gibi araçları kullanmıştır. Analiz ettiği bu araçlardan sonra kendisi basit yapıda bir analiz programı geliştirmiştir [14].

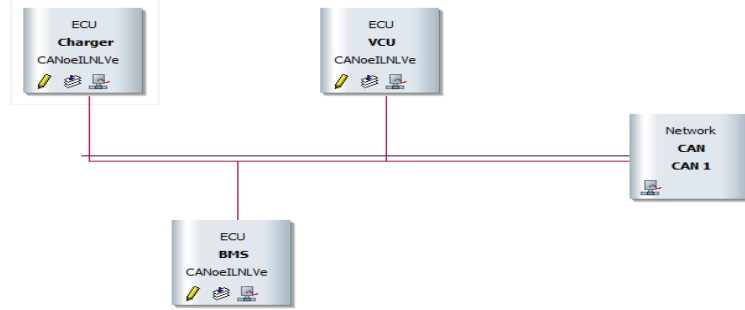
Kelkar ve Kamal (2014), yapmış oldukları çalışmada uyarlanabilir hata teşhis algoritması (AFDCAN) adlı yeni bir algoritma önermektedirler. Düşük maliyetli kaynak kısıtlı dağıtılmış gömülü sistemler için tasarlanmıştır. Önerilen bu algoritma, CAN üzerindeki tüm hatalı düğümleri tespit eder. Bir teşhis döngüsü sırasında yeni düğüm girişine ve onarılan hatalı düğümlerin yeniden girişine izin verir. AFDCAN' in yüksek hata toleransı sağladığı ve güvenilir iletişim sağladığı bulunmuştur [15].

BYS bataryanın sıcaklık, voltaj, akım gibi önemli verileri ölçerek şarj ve deşarj işlemlerini yöneten yazılım ve donanım tabanlı bir sistemdir. Bununla beraber ölçtüğü bu verileri toplayarak belirli algoritmalarla pilin SoC ve SoH değerlerini hesaplar. Pili tehlikeye girdiği durumlarda kullanıcıyı bilgilendirir ve gerekirse sistemi devre dışı bırakabilir. BYS elektrikli araçlarda diğer donanımlarla haberleşmelidir. Bütün donanımların birbirleriyle haberleşmesini sağlayan ve otomotiv sektöründe en çok kullanılan haberleşme protokolü CAN haberleşmesidir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

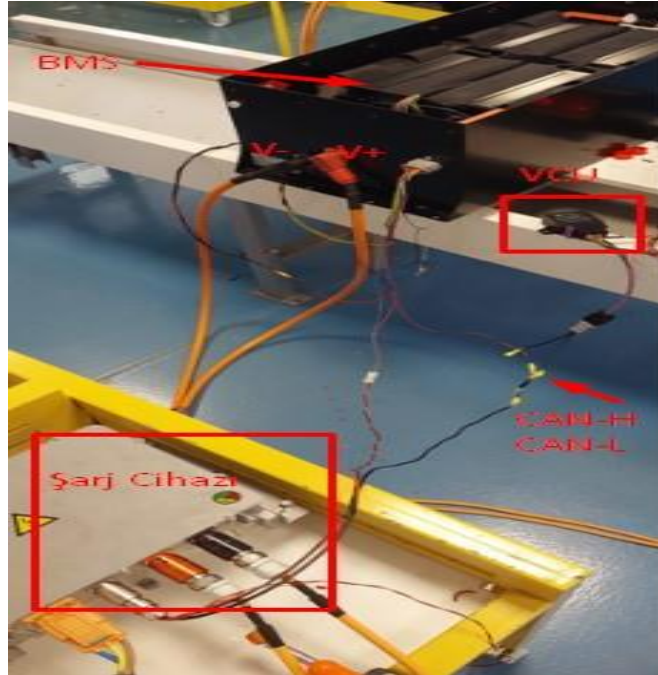
Hazırlanan deney düzeneğinde CAN hattında 3 tane düğüm bulunmaktadır. Bunlar VCU, BYS ve şarj cihazıdır. Bütün bu düğümler birbirleriyle iletişim içerisinde olmalıdır. Her düğüm diğer düğümleri kontrol etmeli ve olası bir arıza durumunda pilleri tehlikeye atmadan sistemi kapatmalıdır. Birbirleriyle iletişim içerisinde olan her bir düğümün kendine ait belirli CAN mesaj kimlikleri bulunmaktadır. Bu mesaj

kimlikleri birbirlerinden bağımsız olmalıdır. CAN hattının düzgün çalışabilmesi için mesaj kimlikleri birbirleriyle karıştırılmamalıdır. Sistem üzerindeki bulunan düğümler Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu düğümler, CANalyzer (CANalyzer.J1939/pro 9.0.86, Vector Informatik GmbH, Stuttgart, Germany) programından alınan görüntüdür.



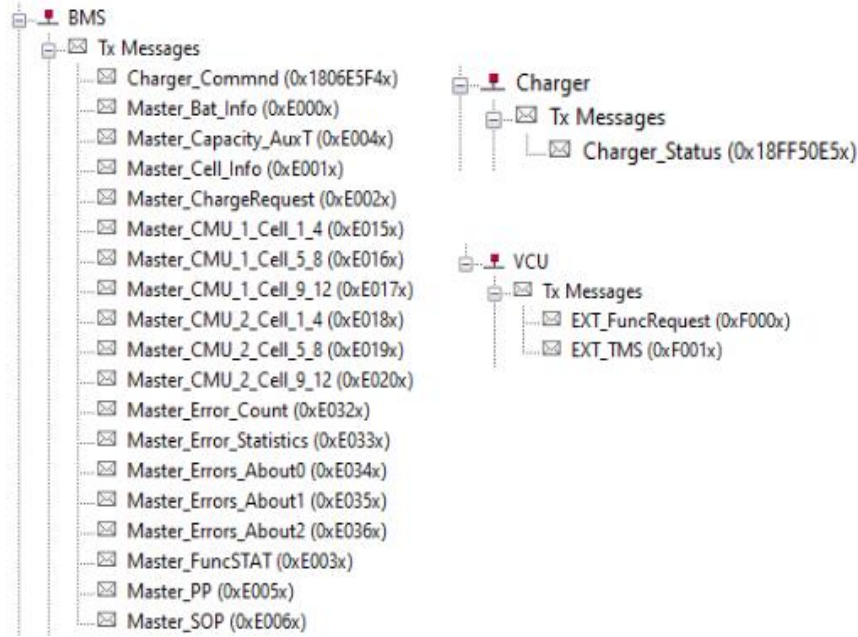
Şekil 1. CAN hattı üzerindeki bulunan düğümler

CAN hattındaki düğümler veriyolunda bir yük oluşturmaktadır.. Oluşan bu yük trafiği incelemek için sisteme VN1630A (Vector Informatik GmbH, Stuttgart, Germany) cihazı ve CANalyzer yazılımı ile deney düzeneğine bağlantı sağlanmıştır. Bu program ve cihaz aracılığı ile CAN hattında bulunan düğümlerin her birinin hat üzerine ne kadar yük oluşturduğu görüntülenmektedir. Ayrıca düğümlerdeki mesajları rahatlıkla görüp analiz edebilmek için database file (.dbc) programa dahil edilebilmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneği

Şekil 2’ de deney düzeneği gösterilmektedir. Deney düzeneğinde nominal 48V bir batarya paketi bulunmaktadır. Bu batarya paketinin kontrolü BY5 üzerinden yapılmaktadır. BY5 sisteminin kontrolü ise VCU ile yapılmaktadır. Deney düzeneğinde şarj cihazı enerjisini şebeke üzerinden almaktadır ve DC gerilim üretmektedir. Ürettiği bu gerilim ile batarya paketini şarj etmektedir.



Şekil 3. Dügümlerin mesaj kimlikleri

CAN hattındaki düğümlerin göndermiş olduğu mesajlar Şekil 3'te gösterilmektedir. BMS, batarya paketinin gerekli tüm bilgilerini bu mesaj kimlikleri ile CAN hattına göndermektedir. VCU düğümünün göndermiş olduğu mesajlar ile batarya paketi aktif veya pasif hale gelmektedir. Şarj cihazının göndermiş olduğu mesaj ise anlık olarak verilerini CAN hattına göndermektedir.

3. BULGULAR (RESULTS)

CAN hattı üzerinde üç tane düğüm bulunmaktadır. Bu düğümler BMS, VCU ve şarj cihazıdır. Bu düğümlerin göndermiş olduğu mesajlar ve bunların sıklığı, CAN hattı üzerinde bir yük oluşturmaktadır. Sistem üzerinde altı farklı test yapılmıştır. Bunlar şu şekildedir:

- CAN Hat hızı = 125 kbit/s, 0xE000 ve 0xE001 mesajları 1ms ve 1s
- CAN Hat hızı = 500 kbit/s, 0xE000 ve 0xE001 mesajları 1ms ve 1s
- CAN Hat hızı = 1000 kbit/s, 0xE000 ve 0xE001 mesajları 1ms ve 1s

CAN hattındaki bu yükü bulmak için üç farklı yöntem kullanılmıştır ve bu yöntemlerden çıkan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Öncelikle CAN hattındaki bu yük için hesaplama yapılmıştır. Hesaplama işlemi yapılırken bit doldurma işlemi yok sayılmıştır ve CAN mesaj çerçevesi bit uzunluğu 128 bit olarak alınmıştır. Her bir mesajın CAN hattı üzerindeki yoğunluğu yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanabilir:

$$t_{bz} = 1 / V_{bh} \quad (3.1)$$

$$t_{mg} = t_{bz} * S_{mb} \quad (3.2)$$

$$M_{bl} = (t_{mg} / t_{mgs}) * 100 \quad (3.3)$$

t_{bz} = Bir bitin gönderilme süresi (ms)

V_{bh} = Bit hızı (kbit/s)

- t_{mg} = Mesajın gönderilme süresi (ms)
- t_{mgs} = Mesajın gönderilme sıklığı (ms)
- S_{mb} = Mesaj bit sayısı
- M_{bl} = Mesajın hat üzerindeki yoğunluğu (%)

1.1. CANBUS HIZI 125 KBIT/S ANALİZİ (CANBus Speed 125 KBIT/S Analysis)

| Statistic | Current / Last | Min | Max | Avg |
|-----------------------------------|----------------|-------|-------|-------|
| Busload [%] | 19.77 | 19.58 | 20.69 | 19.78 |
| Charger | 1.15 | 1.13 | 1.15 | 1.15 |
| Charger_Status (0x18FF50E5x) | 1.15 | 1.13 | 1.15 | 1.15 |
| VCU | 2.37 | 2.33 | 2.38 | 2.37 |
| EXT_FuncRequest (0xF000x) | 1.19 | 1.17 | 1.19 | 1.19 |
| EXT_TMS (0xF001x) | 1.18 | 1.16 | 1.18 | 1.18 |
| BMS | 16.24 | 16.05 | 17.22 | 16.27 |
| Charger_Commnd (0x1806E5F4x) | 1.17 | 1.17 | 1.26 | 1.17 |
| Master_Bat_Info (0xE000x) | 1.14 | 1.12 | 1.14 | 1.14 |
| Master_Capacity_AuxT (0xE004x) | 1.18 | 1.18 | 1.27 | 1.18 |
| Master_Cell_Info (0xE001x) | 1.09 | 1.07 | 1.09 | 1.09 |
| Master_ChargeRequest (0xE002x) | 1.19 | 1.19 | 1.29 | 1.19 |
| Master_CMU_1_Cell_1_4 (0xE015x) | 1.10 | 1.09 | 1.19 | 1.10 |
| Master_CMU_1_Cell_5_8 (0xE016x) | 1.12 | 1.11 | 1.20 | 1.12 |
| Master_CMU_1_Cell_9_12 (0xE017x) | 1.18 | 1.17 | 1.27 | 1.18 |
| Master_CMU_2_Cell_1_4 (0xE018x) | 1.09 | 1.08 | 1.17 | 1.09 |
| Master_CMU_2_Cell_5_8 (0xE019x) | 1.10 | 1.10 | 1.19 | 1.10 |
| Master_CMU_2_Cell_9_12 (0xE020x) | 1.19 | 1.19 | 1.29 | 1.19 |
| Master_Error_Count (0xE032x) | 0.12 | 0.05 | 0.12 | 0.11 |
| Master_Error_Statistics (0xE033x) | 0.12 | 0.00 | 0.12 | 0.12 |
| Master_Errors_About0 (0xE034x) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Master_Errors_About1 (0xE035x) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Master_Errors_About2 (0xE036x) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Master_FuncSTAT (0xE003x) | 1.13 | 1.13 | 1.23 | 1.13 |
| Master_PP (0xE005x) | 1.18 | 1.16 | 1.18 | 1.18 |
| Master_SOP (0xE006x) | 1.17 | 1.17 | 1.26 | 1.17 |

Şekil 4. Deney düzeneği 125 kbit/s ve 100 ms gönderme sıklığı ile düğümlerin hat yükleri

Şekil 4'te 125 kbit/s ve 0xE000 ve 0xE001 mesajlarının 100 ms ile gönderildiği deney düzeneğindeki her bir mesajın ayrı ayrı hat üzerinde oluşturduğu yükler gösterilmektedir. Şarj cihazının hat üzerinde oluşturduğu maksimum hat yükü %1.15, VCU düğümünün %2.38 ve BMS düğümünün oluşturduğu hat yükü ise %17.22 olduğu saptanmıştır. Bu testte elde edilen verilere göre tüm düğümlerin CAN hattında oluşturduğu toplam hat yükü maksimum %20.69 olduğu görülmüştür.

1.2. CAN HIZI 500 KBIT/S ANALİZİ (CANBus Speed 500 KBIT/S Analysis)

Şekil 5'te 500 kbit/s ve 0xE000 ve 0xE001 mesajlarının 100 ms ile gönderildiği simülasyon programında her bir mesajın ayrı ayrı hat üzerinde oluşturduğu yükler gösterilmektedir. Şarj cihazının hat üzerinde

oluşturduğu maksimum hat yükü %0.28, VCU düğümünün %0.59 ve BYS düğümünün oluşturduğu hat yükü ise %4.03 olduğu saptanmıştır. Bu testte elde edilen verilere göre tüm düğümlerin CAN hattında oluşturduğu toplam hat yükü maksimum %4.91 olduğu görülmüştür.

| Statistic | Current / Last | Min | Max | Avg |
|-----------------------------------|----------------|------|------|------|
| Busload [%] | 4.91 | 4.91 | 4.91 | 4.91 |
| Charger | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Charger_Status (0x18FF50E5x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| VCU | 0.59 | 0.59 | 0.59 | 0.59 |
| EXT_FuncRequest (0xF000x) | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| EXT_TMS (0xF001x) | 0.30 | 0.30 | 0.30 | 0.30 |
| BMS | 4.03 | 4.03 | 4.03 | 4.03 |
| Charger_Commnd (0x1806E5F4x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Master_Bat_Info (0xE000x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_Capacity_AuxT (0xE004x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Master_Cell_Info (0xE001x) | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.27 |
| Master_ChargeRequest (0xE002x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Master_CMU_1_Cell_1_4 (0xE015x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_CMU_1_Cell_5_8 (0xE016x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_CMU_1_Cell_9_12 (0xE017x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_CMU_2_Cell_1_4 (0xE018x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_CMU_2_Cell_5_8 (0xE019x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_CMU_2_Cell_9_12 (0xE020x) | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| Master_Error_Count (0xE032x) | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Master_Error_Statistics (0xE033x) | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 |
| Master_FuncSTAT (0xE003x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Master_PP (0xE005x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Master_SOP (0xE006x) | 0.29 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |

Şekil 5. Simülasyon 500 kbit/s ve 100 ms gönderme sıklığı ile düğümlerin hat yükleri

1.3. CAN HIZI 1000 KBIT/S ANALİZİ (CANBus Speed 1000 KBIT/S Analysis)

Hat üzerinde bulunan mesajların kimlik bilgileri, gönderme sıklıkları ve hat üzerindeki yoğunlukları gibi bilgiler Tablo 1’de gösterilmiştir. 0xE000 mesajının hatta olan yoğunluğu şu şekilde hesaplanabilir:

$$t_{bz} = 1 / 1000 = 0.001 \text{ ms}$$

$$t_{mg} = 0.001 * 128 = 0.128 \text{ ms}$$

$$M_{bl} = (0.128 / 100) * 100 = \% 0.128$$

Buradaki yapılan hesaplamada, 0xE000 ve 0xE001 mesaj kimliklerine sahip olan mesajların gönderilme sıklıkları 100 ms olarak ayarlanmıştır. Bit uzunlukları sabit 128 olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamalara göre şarj cihazının hat üzerindeki yoğunluğu %0.128, araç kontrol ünitesinin yoğunluğu %0.256 ve batarya yönetim sisteminin hat üzerindeki yoğunluğu ise %1.8176 olarak bulunmuştur. Tüm düğümlerin hat üzerindeki yoğunluğu ise %2.20 olarak bulunmuştur.

Tablo 1. Hesaplama 1000 kbit/s ve 100ms gönderme sıklığı ile toplam hat yükü

| Gönderen Düğüm | Mesaj ID | Gönderme Sıklığı(ms) | Bit Uzunluğu | Hat Yüğü (%) |
|----------------|------------|----------------------|-------------------------|---------------|
| Şarj Cihazı | 0x18FF50E5 | 100 | 128 | 0.128 |
| VCU | 0xF000 | 100 | 128 | 0.128 |
| VCU | 0xF001 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE000 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE001 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE002 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE003 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE004 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE005 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE006 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE015 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE016 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE017 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE018 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE019 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE020 | 100 | 128 | 0.128 |
| BYS | 0xE032 | 1000 | 128 | 0.0128 |
| BYS | 0xE033 | 1000 | 128 | 0.0128 |
| BYS | 0x1806E5F4 | 100 | 128 | 0.128 |
| | | | Toplam Hat Yüğü: | 2.2016 |

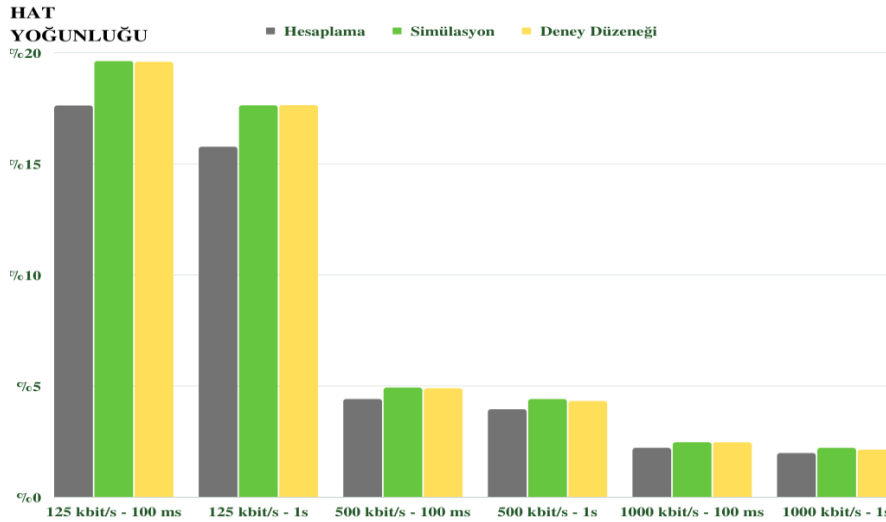
3.4. GENEL ANALİZ (GENERAL ANALYSIS)

Farklı CAN hızlarında ve farklı mesaj gönderme sıklıklarında yapılan testlerin sonuçları Tablo 2'de ve Şekil 6.'da gösterilmiştir.

Tablo 2. Toplam hat yükleri

| CAN hızı | Gönderilme sıklığı | Toplam hat yükü | | |
|-------------|--------------------|-----------------|------------|------------|
| | | Hesaplama | Simülasyon | Gerçek hat |
| 125 kbit/s | 100 ms | %17.61 | %19.62 | %19.58 |
| | 1s | %15.76 | %17.62 | %17.73 |
| 500 kbit/s | 100 ms | %4.40 | %4.91 | %4.88 |
| | 1s | %3.94 | %4.40 | %4.31 |
| 1000 kbit/s | 100 ms | %2.20 | %2.45 | %2.45 |
| | 1s | %1.97 | %2.20 | %2.12 |

Hesaplama işlemi yapılırken bit doldurma işlemi yok sayılmıştır ve mesaj bit uzunluğu 128 bit olarak alınmıştır. Bundan dolayı yapılan hesaplama işleminde elde edilen sonuç minimum değerdir. Tablo 2'deki veriler, tüm yapılan testlerden elde edilen sonuçların minimum değerleridir. Hesaplama yöntemiyle yapılan sonuçlardan elde edilen verilere göre 125 kbit/s, 100 ms mesaj gönderme sıklığında hattın toplam yoğunluğu %17.61'dir. Simülasyon sonucunda bu değer %19.62, deney düzeneğinde ise %19.58 olarak bulunmuştur.

**Şekil 6. Toplam hat yükleri çubuk grafiği**

Hat yoğunluğu, 3 farklı CAN hızlarında ve mesaj sıklıkları değiştirilerek yapılan test sonuçlarından elde edilen veriler Şekil 6'da gösterilmiştir. Farklı renklerle gösterilen çubuk grafiğinde, gri renk ile gösterilen hesaplama yöntemini, yeşil renk simülasyon sonuçlarını ve sarı renk ile gösterilen veriler ise deney düzeneğinden elde edilen verileri göstermektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada batarya yönetim sistemi, şarj cihazı ve araç kontrol ünitesinin bulunduğu CAN hattına bağlantı sağlanmıştır. Bu CAN hattında bulunan düğümler birbirlerine belirli bir mesajlar gönderirler ve böylelikle birbirleri ile iletişim halinde olurlar. Yapılan analizlerle beraber farklı CAN hızlarında verilerin hatta olan yoğunluğu incelenmiştir. 3 farklı hızlarda belirlenen bu deney düzeneğinde her bir hızda farklı bir yoğunluk bulunmuştur ve bunun hesaplaması yapılmıştır.

Bütün yapılan testlerde sadece iki tane mesajın gönderilme sıklığı 100 ms ve 1 s olarak değiştirilmiştir. Diğer mesajların gönderilme sıklıkları sabit tutulmuştur. Hat yükü hesabı yapılırken her bir mesajın hat üzerindeki yoğunluğu hesaplanır ve bunların hepsinin toplamı genel hat yükü olarak kabul edilir. Hesaplama işlemi bulunan hat yükü, simülasyon ve deney düzeneği üzerinde bulunan hat yükü ile farklı sonuç çıkmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi CAN protokolünün bit doldurma işlemi yapmasıdır. Gelen her verinin değişmesine göre bit uzunluğu değişmektedir. Bu yüzden hesaplama işlemi yapılırken mesajların bit uzunluğu sabit 128 olarak alınmıştır. Simülasyon ve deney düzeneği üzerindeki yoğunluk birbirine yakın çıkmaktadır. Bunun sebebi ise simülasyon ortamında yapılan testlerde bit doldurma işlemi program üzerinden hesaplanmıştır. Ancak buna rağmen tamamen aynı sonuç çıkması beklenemez çünkü deney düzeneği üzerindeki mesajların göndermiş olduğu veriler sürekli olarak değişmektedir. Bunun sonucunda ise bit doldurma işlemi sürekli olarak değişmektedir.

CAN hızının belirlenmesinde önemli olan faktör genel olarak düğümlerinin birbirine olan uzaklıklarıdır. CAN hızı seçildikten sonra mesajların gönderilme sıklıkları verilerin önem sırasına göre ayarlanabilir. Yapılmış olan deney düzeneğinde BYS düğümünün hata mesajları saniyede bir defa göndermektedir. Diğer veriler 100 ms ile diğer düğümlere gönderilmektedir. Yapılan testlerde 0xE000 ve 0xE001 adreslerinden gelen sinyallerin gönderilme sıklıkları değiştirilmiştir ve hatta olan yükleri analiz edilmiştir. CAN hattının yoğunluğu maksimum %50 veya %60 civarlarında olması kabul edilebilir. Tasarlanan bu deney düzeneğinde 125 kbit/s hızında maksimum %20.69 olmuştur ve bu yoğunlukta kabul edilebilir bir yüzdendir. Ancak düğümlerin fazlaşması veya CAN hattına gönderilen mesajların artmasıyla bu yüzde değişecektir.

CAN hattının yoğunluğu ve BYS ile ilgili farklı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda ya sadece batarya yönetim sistemi geliştirilmiş veya sadece CAN hattının yoğunluğu hesaplanmıştır. Hesaplanan bu hat yoğunlukları belirli bir sistem üzerindeki yapılan hesaplamalardır. Yani CAN hattının hızlarının değiştirilmediği veya mesajların gönderilme sıklıklarının sabit olduğu çalışmalardır. Ancak yapılmış olan bu çalışmada, bataryanın güvenli bir şekilde çalışabileceği bir batarya yönetim sistemi tasarlanıp CAN hattı üzerindeki her bir mesajın yoğunluğu farklı hızlarda hesaplanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lawrenz, W. (1997). CAN System Engineering: From Theory to Practical Applications. Springer, New York.
- [2] Bosch, (1991). CAN Specification, Version 2.0, Robert Bosch GmbH, Stuttgart.
- [3] Kiencke, U. (1994). Controller Area Network - From Concept to Reality. In Proceedings of 1st International CAN Conference, Can in Automation (CIA). 04-07 October, Erlangen, 11-20.
- [4] Farsi, M., Ratcliff, K., Babosa M., "An overview of Controller Area Network", Computing & Control Engineering Journal June, 113-120, 1999.
- [5] Marino, P., Dominguez, M., A., Poza, F., Machoda, F., "Fieldbuses Education Using Training System Designed With State-Of-The- Art Technologies", 18th International Conference on Systems Engineering, 2005

- [6] F. Li, L. Wang and C. Liao, "CAN (Controller Area Network) Bus Communication System Based on Matlab/Simulink," 2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/WiCom.2008.1004
- [7] Özçelik, İ., Ertürk, İ. & Ekiz, H. (2001). CAN – Eternet Uyumlu Köprü Tasarımı ve Uygulaması. EEBM 9. Ulusal Kongresi. 17-22 Eylül, İzmit, 264-268.
- [8] Zuberi, K.M. & Shin, K.G. (1995). Non – Preemptive Scheduling of Messages on Control Area Network for Real – Time Applications, In Proc. Of the IEEE Real Time Applications Symposium. 15-17 May, Chicago, IL, USA, 240–249.
- [9] Renjun Li, Chu Liu and Feng Luo, "A design for automotive CAN bus monitoring system," 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008, pp. 1-5, DOI: 10.1109/VPPC.2008.4677544.
- [10] Lawrenz, W. (1995). Worldwide Status of CAN–Present and Future. In Proceedings of 2nd International CAN Conference, CAN in Automation (CIA), Erlangen. 13-14 October, London. 2-16.
- [11] Tindell, K., Hanssmon, H. & Wellings, A.J. (1994). Analysing Real-Time Communications: Controller Area Network (CAN). 1994 Proceedings Real-Time Systems Symposium. 07-09 December, San Juan, PR, USA, 259-263.
- [12] Natale M.D., Scheduling the CAN BUS with Earliest DeadlineTechniques, 21st IEEE Real-Time Systems Symposium, 2000, Proceedings., 259-268.
- [13] Tindell, K., Burns, A. & Wellings, A.J. (1995). Calculating controller area network (CAN) message response times. Control Engineering Practice, 3(8), 1163-1169.
- [14] Rohrer, R.A., Pitla, S.K. & Luck, J.D. (2019). Tractor CAN bus interface tools and application development for real-time data analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 163, 104847.
- [15] Kelkar, S. & Kamal, R. (2014). Adaptive fault diagnosis algorithm for controller area network. IEEE transactions on Industrial Electronics, 61(10), 5527-5537.

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF METHANE IN A PRE-MIXED COMBUSTOR UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

Çağrı TÜMER^{1,*}  Serhat KARYEYEN² 

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 31.07.20222
Revision: 24.10.2022
Accepted: 02.11.20222

Highlights

- CFD Modelling.
- Premixed Combustion.
- Reaction Mechanism.

Keywords

Distributed Combustion
Ultra- Low Emission
Premixed Burner

The results of the products as a result of combustion were investigated for the air excess coefficients of 1.2 and 1.7 under the colorless distributed combustion conditions of these different premixed methane fuels.

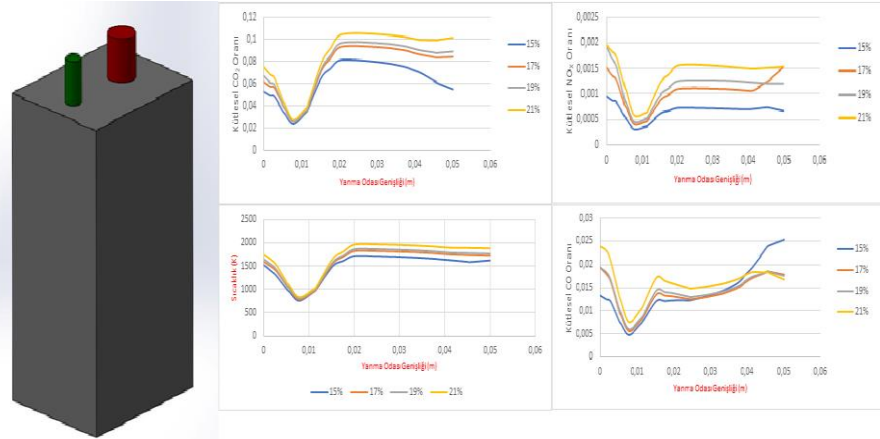


Figure A. Experimental system, numerical modelling and graphical results

Purpose: As a result of our ever-increasing energy needs, the negative impact of the fuels we use on our world is increasing day by day. It will be more appropriate to use methane fuel in suitable environments, as a result of the application of colorless distributed combustion conditions, as its emissions decrease to a very low level.

Theory and Methods: Before sending the methane gas to the combustion chamber, it is prepared externally as pre-mixed. The fuel-air mixture was used as premix at $\lambda=1.2$ and $\lambda=1.7$ air excess ratios. In the presented study, fuel rates corresponding to 10 kW power are presented. For combustion reactions, GRI-MECH 3.0 was used, where a 64-step chemical reaction was created and integrated into the Eddy Dissipation Concept model and models were performed. Colorless distributed combustion conditions were achieved by changing the 21% O₂ ratio in the air to 19%, 17% and 15%. For the modeling, the excess air coefficient was first accepted as $\lambda=1.2$ and the results obtained as a result of these conditions were evaluated. Then, the excess air coefficient was changed to $\lambda=1.7$ and the effects of the excess air coefficient on the colorless dispersed combustion conditions were investigated.

Results: As a result of the study, when two different excess air coefficients were compared, a decrease was observed in all emissions.

Conclusion: The obtained emission profiles were compared with the experimental data and it was determined that there was a satisfactory agreement. The 64-step reaction appears to be sufficient under conditions of excess air coefficient and colorless distributed combustion.

GU J Sci, Part C, 10(4): 895-924 (2022)



Gazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Dergisi

PART C: TASARIM VE TEKNOLOJİ


<http://dergipark.gov.tr/gujsc>

NUMERICAL INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF METHANE IN A PRE-MIXED COMBUSTOR UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

Çağrı TÜMER^{1,*} Serhat KARYEYEN²

¹Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Science, 06500, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

Due to the increase in energy demand and the depletion of fossil energy resources worldwide, resources should be used more efficiently. The damage to the environment of the resources used increases in parallel with the increase in energy demand and causes irreversible damages. With colorless distributed combustion approach, it was aimed to minimize the environmental damage of the fuels, and in this study, colorless distributed combustion method was applied. Premixed air-fuel mixture was introduced into a combustor, and the results were examined by changing the excess air coefficient (λ) under different conditions. The combustion reactions were first determined. 21% O₂ concentration in the air was changed to 19%, 17%, and 15%, and colorless distributed combustion was achieved. Excess air ratio $\lambda=1.2$ was first determined, and the results obtained is evaluated. Then, excess air ratio was changed as $\lambda=1.7$, and excess air ratio effects on colorless distributed combustion was investigated. Modeling was performed using Ansys Fluent Student Edition software. Species Transport combustion model and P-1 radiation model were selected for three-dimensional numerical modeling in Ansys Fluent software. GRI-MECH reaction mechanism was used, 64-step chemical reactions were created, and embedded to the Eddy Dissipation Concept model. The existing modeling results were compared for the validation of the model, and it is concluded that the results are in good agreement with the existing results. Modelings were performed at boundary conditions being a thermal power of 10 kW (about a thermal intensity of 70 MW/m³.atm). In order to achieve colorless distributed combustion, modelings that oxygen concentration in the air inside the fuel-air mixture was to be 21% O₂ (conventional combustion), 19% O₂, 17% O₂, and 15% O₂ were performed. N₂ was selected as the diluent to achieve colorless distributed combustion (simulation of combustion products recirculation). According to the results, via colorless distributed combustion, a more uniform thermal field which is particularly so important for gas turbines and/or aircraft engine combustors was obtained along with decrease in CO₂, NO_x, and CO emissions.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 31.07.2022
Düzeltilme: 24.10.2022
Kabul: 02.11.2022

Keywords

- CFD Modelling.
- Premixed Combustion.
- Reaction Mechanism.

Anahtar Kelimeler

Distributed Combustion
Ultra- Low Emission
Premixed Burner

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA METAN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Öz

Dünya genelinde enerji ihtiyacındaki artış ve fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması sebebiyle kaynakların daha verimli kullanılması gerekmektedir. Kullanılan kaynakların çevreye olan zararları ise enerji ihtiyacındaki artış ile paralel olarak artmakta ve geri dönülemez zararları sebep olmaktadır. Renksiz dağıtılmış yanma yaklaşımı ile yakıtların çevreye olan zararlarını azaltmak amaçlanmış ve bu çalışmada da renksiz dağıtılmış yanma metodu uygulanmıştır. Bir yakıcı içerisinde ön karışimli olarak hava-yakıt karışımı gönderilmiş ve farklı koşullar altında hava fazlalık katsayısının (λ) da etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma yapılırken öncelikle yanma reaksiyonu hesaplanmıştır. Hava içerisindeki molce %21 O₂ oranı, %19, %17 ve %15 olacak şekilde değiştirilerek renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılmıştır. Modellemeler için hava fazlalık katsayısı öncelikle $\lambda=1.2$ kabul edilmiş ve bu şartlar sonucunda ortaya çıkan sonuçlar

değerlendirilmiştir. Ardından, hava fazlalık katsayısı $\lambda=1.7$ olarak değiştirilmiş ve hava fazlalık katsayısının renksiz dağıtılmış yanma şartlarına olan etkileri araştırılmıştır. Modellemeler Ansys Fluent Student Edition yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys Fluent yazılımında üç boyutlu sayısal modelleme için Species Transport yanma modeli ve P-1 radyasyon modeli seçilmiştir. Yanma reaksiyonları için GRI-MECH 3.0 kullanılmış, burada 64 basamaklı bir kimyasal reaksiyon oluşturulmuş ve Eddy Dissipation Concept modeline entegre edilerek modellemeler gerçekleştirilmiştir. Model ve reaksiyon sonucu doğrulaması için önceki modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapılmış ve uyum tespit edilmiştir. 10 kW ısı gücü (yaklaşık 70 MW/m³.atm ısı yoğunluk) sınır şartlarında modellemeler gerçekleştirilmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılması için yakıt hava karışımı içerisindeki havanın oksijen konsantrasyonu sırasıyla %21 O₂ (konvansiyonel yanma), %19 O₂, %17 O₂ ve %15 O₂ olacak şekilde çalışma yapılmıştır. Renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için seyreltici olarak N₂ seçilmiştir (yanma sonu ürünlerinin resirkülasyonunun temsili için). Sonuçlar irdelendiğinde, renksiz dağıtılmış yanma ile, özellikle gaz türbinlerinin ve/veya uçak motorlarının yanma odaları için oldukça önemli olan daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilirken CO₂, NO_x ve CO emisyonlarında önemli derecede azalmalar gözlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelimler ve yatırımlar artmaktadır. Ancak, Dünya enerji ihtiyacının büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Ulaşımında kullanılan araçların enerji ihtiyacını karşılamak için akaryakıtların, konutların ısıtılmasında doğalgazın veya kömürün ya da elektrik üretiminde neredeyse tüm fosil yakıtların kullanıldığı unutulmamalıdır. 2019 yılında Stanford üniversitesinin yaptığı bir araştırmaya göre [1] enerji kaynaklarının bulunmuş rezervlerinden petrolün 2050'li, doğalgazın 2060'lı ve kömürün ise bu yüzyılın sonlarında tükeneceği değerlendirilmektedir. Kullanılan fosil yakıtların enerji kapasitelerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğundan daha yüksek oldukları da bilinmektedir. [2]. Tükeneceği güne kadar kullanılmaya devam edilmesi yüksek ihtimal olan bu kaynaklardan enerji üretmenin de önemli maliyetleri bulunmaktadır. Ancak günümüzde maliyetlerden daha önemlisi ise çevresel faktörler ve bunların sonucu küresel ısınmaya olan olumsuz etkileridir. Fosil yakıtların kullanılması sonucu açığa çıkan CO, CO₂, NO_x, SO_x vb. emisyonlar, çevresel kirlenmeye ve küresel ısınmaya etki etmektedir [3]. Bu sebeple fabrikaların, enerji santrallerinin, araçların bile baca gazı emisyonları (egzoz) düzenli olarak kontrol edilmekte ve emisyonları azaltmak amaçlı çalışmalar yapılmaktadır.

Küresel ısınmanın ve fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan emisyonların kısa vadede etkileri toprak ve çevre kirliliği olsa da asıl problem uzun vadede oluşturduğu etkilerdir. Bunların da en önemlileri kuraklık, çölleşme, sel ve asit yağmurlarıdır [4]. Dünyadaki yaşamı etkileyebilecek bu etkilerin tehlikelerini azaltmak için bilim insanları yanma sonu emisyonları düşürebilmek adına bilimsel çalışmalar yapmaktadırlar. Çalışmalardan bazıları şöyle değerlendirilebilir. HITAC (High Temperature Air Combustion) yüksek sıcaklıkta havanın yakılması anlamında olan bu yanma şeklinde yanma işlemi büyük hacimde, neredeyse tüm yakıcı hacmine yayılarak gerçekleşmektedir. Yanma işleminde kullanılan yüksek sıcaklıklı ve oldukça düşük oksijen konsantrasyonlu hava kullanılmakta, bu sayede hacimsel yanma ile birlikte alevsiz yanma başarılarak yanma sonu kirlenici emisyonlar azaltılabilmektedir [5]. MILD (Moderate or Intense Low Dilution) hem reaktanların yüksek sıcaklığı hem de yanma sürecinde düşük sıcaklık artışı ile karakterize edilmektedir [6]. FLOX (Flameless Oxidation) alevsiz yanma, yüksek bir dahili baca gazı devridaimi ile büyük bir hacme aktarılmaktadır. Bu teknoloji diğerlerinde de olduğu gibi çok düşük kirlenici emisyonların başarılmasına olanak sağlamaktadır [7]. CDC (Colorless Distributed Combustion) [8] renksiz dağıtılmış yanma, yanma odasına giren havanın bünyesinde bulunan O₂ konsantrasyonunun azaltılması ile başarılı ve bu sayede daha uniform bir sıcaklık dağılımı ile birlikte kirlenici emisyonların önemli ölçüde azaltıldığı yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Geleneksel alevli yanma sırasında yüksek NO_x seviyeleri ortaya çıkarken, renksiz dağıtılmış yanmada alevin görünürlüğünün ve dolayısıyla da yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ile birlikte oldukça düşük NO_x seviyelerinin başarıldığı gözlenmiştir. Örneğin, Karyeyen vd. [9] 300K giriş sıcaklığı altında renksiz dağıtılmış yanmanın şartlarının uygulandığı, hidrojen bakımından zengin yakıtlar üzerinde çalışma yapmışlardır. Renksiz dağıtılmış yanmanın OH* ışıltama görüntülerinin yanı sıra kirlenici NO_x ve CO emisyonlarına olan etkilerini de araştırmışlardır. Seyrelticilerin karışıma

eklenmesi ile birlikte OH* seviyelerinin, NO_x ve CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı yakıt incelenmiş ve seyreltici olarak CO₂ ve N₂ kullanılmıştır.

Khalil ve Gupta [10] çalışmalarında kullandıkları yakıtın içerisine hidrojen ekleyerek hidrojen zengin yakıt elde etmişlerdir ve hidrojen zenginleştirme işlemi ile CO emisyonunda dikkate değer bir azalma sağlandığı ve tutuşma sınırının da genişlediği tespit edilmiştir. Çalışmalarında kullandıkları dağıtılmış yanma yöntemi sayesinde geliştirilmiş alev yapısı, ultra düşük emisyonlar ve verimliliği artırmak için yüksek yoğunluklu düşük oksijen konsantrasyonlu koşullar altında önemli faydalar sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Yu vd. [11] alevsiz yanma şartları altında hidrojen bakımından zenginleştirilmiş yakıtları incelemişler ve farklı yakıtları farklı hidrojen oranları için araştırmışlardır. Hidrojen bakımından zenginleştirilmiş olan yakıtın yanması sonucunda NO_x oluşumunu azaltmak için alevsiz yanmanın büyük ölçüde katkı sağladığını belirlemişlerdir. Yanma sonucunda ise NO_x ve CO emisyonlarının sıfıra çok yaklaştığı görülmüştür.

Derudi vd. [12] yaptığı çalışmada geleneksel yakıtların aksine geleneksel olmayan yakıtlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Kok fırını gazı olarak isimlendirilen yakıtın hidrojen içeren halinde verimli bir yanmaya olanak sağladığı görülmüştür. Hidrojen içeren yakıtlarda jet hızının daha yüksek olması gerektiği ve fırın sıcaklıklarının daha düşük ortalamalarda çalışabilmesi için yanma havasının ön ısıtmasını azalmasının sağlandığı belirlenmiştir.

Khalil ve Gupta [13] bu çalışmada renksiz dağıtılmış yanmanın ultra düşük emisyon, alev kararlılığı ve termal alanın daha homojen olması üzerindeki etkilerini göstermiştir. Kullandıkları üç farklı yakıtta dağıtılmış yanma şartlarının etkilerini araştırmışlardır. Yakıt olarak metan kullanıldığında oksijen konsantrasyonu %11 - %13 arasına kadar azaltılabilirken, NO_x emisyonunda %85 azalma gözlenmiştir. Yakıtların sıcaklıkları 300 K ile 750 K arasında değişirken NO_x emisyonunun 1 ppm'den daha az olduğunu göstermişlerdir.

Liv vd. [14] çalışmalarında sayısal ve deneysel olarak MILD koşulları altında metan yakıtını kullanmışlardır. Metana H₂ ilavesinin NO_x emisyonu üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda NO_x emisyonunun önemli ölçüde değişmediğini tespit etmişlerdir.

İlbaş ve Karyeyen [15] model bir yanma odasında birbirinden farklı bileşenlere sahip yakıtları sayısal olarak modellemişlerdir. Modelleme sonucunda ise emisyonları karşılaştırmışlardır. Yanma modeli olarak PDF/Mixture Fraction, radyasyon modeli olarak P-1, türbülans modeli için k-ε kullanılmıştır. Yanma sonuçları incelendiğinde hidrojen zengin yakıtlar için NO_x emisyonlarının daha yüksek olduğu, bu durumun ise ikincil ve seyreltme havası beslenerek aşıldığı belirlenmiştir.

Hashemi vd. [16] simetrik ve ani genişlemeli bir yanma odasında yakıt olarak metan kullanmışlar ve sonucun NO_x emisyonundaki değişimine etkisini incelemişlerdir. Yanma modeli olarak β-PDF, türbülans modeli olarak k-ε kullanılmıştır. Türbülansın artmasıyla NO emisyonu önemli ölçüde azalmıştır. Yanma odası tasarımıdaki hava giriş açısının artırılması da NO emisyonunun azaltılması üzerinde etkili olmuştur.

Yılmaz ve İlbaş [17] yeni bir yanma odası tasarımı geliştirmişlerdir. Bu yanma odasına ise doğalgaz yakıcı bağlamışlardır. Farklı içeriklere sahip yakıtı deneysel olarak yakmışlardır. Yanma sonucunda ortaya çıkan sıcaklık ve emisyon değerlerini, tasarladıkları yanma odasının dikey duvarlarına açtıkları delikler sayesinde ölçmüşlerdir. Sonuçlar incelendiğinde yakıt içerisindeki hidrojen konsantrasyonu artırıldıkça yanma odası sıcaklıkları ve NO_x emisyonlarının yükselme olurken CO ve CO₂ emisyonlarında ise azalmalar görülmüştür.

Çalışmada Şekil-1 ve Şekil-2 de gösterilen yanma odası içerisine, metan-hava karışimli yanabilir bileşen, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarında beslenerek yanma ve emisyon karakteristikleri sayısal olarak araştırılmıştır. Yakıt-hava karışımı, yanma odasına girmeden önce ön karışimli olacak şekilde yanma odasına beslenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma koşullarının başarılması için, hava bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %2 lik değişimleri azaltılarak, %21, %19, %17 ve %15 olacak şekilde karışım oranları belirlenmiştir. Bu işlem için seyreltici olarak N₂ kullanılmıştır. Yanma şartları için hava fazlalık katsayıları λ=1.2 ve λ=1.7 olarak belirlenmiş olup bu hava fazlalık katsayılarının başarılması için gerekli O₂ miktarları seyreltme ile de değiştirilmemiştir. Bu oranlarda, renksiz dağıtılmış yanmanın da etkisiyle yanma hızı yavaşlamış, yanmanın karakteristiğindeki değişiklikler ve yanma sonunda ortaya çıkan emisyonlar üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Çalışmada, özellikle küçük hacimli bir yanma odası tercih edilmiştir. Buradaki temel sebep, hacim küçültülerek gaz türbinlerinin ısı yoğunluk (thermal intensity)

değerlerini temsil edilmesi ve renksiz dağıtılmış yanmanın gaz türbinleri için uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Gaz türbinlerinin çalıştırıldığı ısı yoğunluklar, kullanım alanına göre değişmekle birlikte 20-30 MW/m³.atm değerlerinin üzerinde olup çalışmada kullanılan yanma odasının ısı yoğunluğu, 10 kW'lık ısı gücü de değerlendirildiğinde yaklaşık 70 MW/m³.atm civarında olacak şekilde seçilmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Çalışmada yakıt olarak metan kullanılmıştır. Metanın yanma reaksiyonu ise, daha iyi sonuç verebilmesi için Ansys – Chemkin kullanılarak ekteki tabloda tüm basamakları ile birlikte sunulmuştur. [EK-1]. Yakıt-hava karışımı ön karışimli olarak yanma odasına beslenirken $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları ile hava içerisinde oksijen yüzdesi %21 O₂'den, %19 O₂, %17 O₂ ve %15 O₂ oranlarına azaltılarak renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılmasına olanak sağlanmıştır. Seçilen yanma odası, sınır koşulları, türbülans ve radyasyon modellerinin detayları çalışmanın sonraki bölümlerinde sunulmuştur. Tablo-1'de reaksiyona giren türlerin mol fraksiyon olarak hesaplaması verilmiştir.

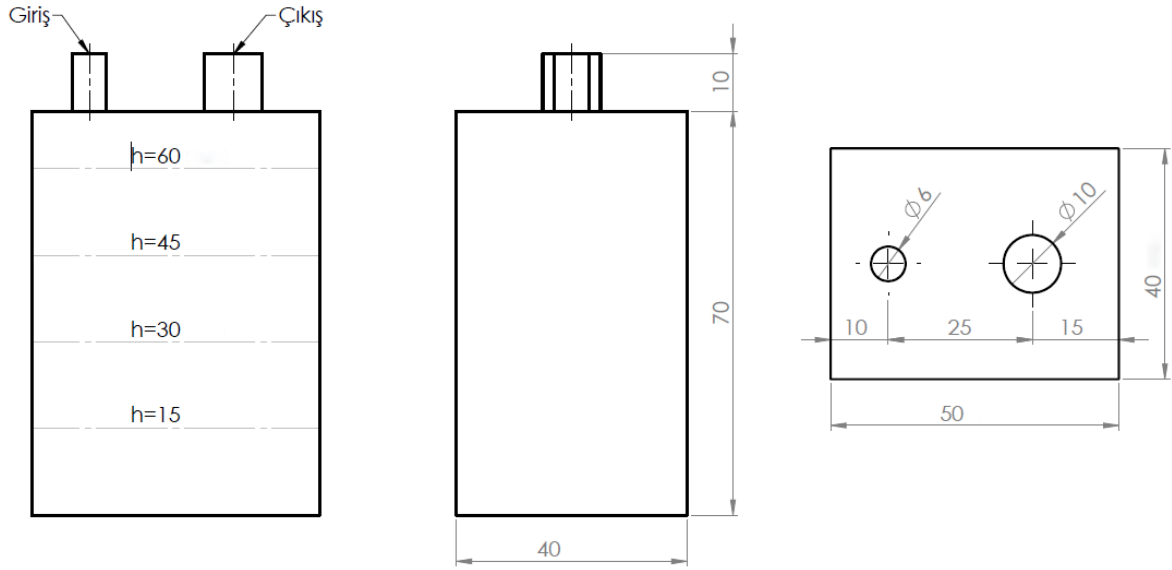
| 21%O ₂ | | 19%O ₂ | |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------|
| <i>n(mol)</i> | <i>mol fraksiyonu</i> | <i>n(mol)</i> | <i>mol fraksiyonu</i> |
| 1CH ₄ | 0,080489CH ₄ | 1 CH ₄ | 0,0732 CH ₄ |
| 2,4O ₂ | 0,193171O ₂ | 2,4O ₂ | 0,1763O ₂ |
| 9,024N ₂ | 0,72634N ₂ | 10,2315N ₂ | 0,7505N ₂ |
| n_{Toplam} = 12,424 | 1 | n_{Toplam} = 13,631 | 1 |
| 17%O ₂ | | 15%O ₂ | |
| <i>n(mol)</i> | <i>mol fraksiyonu</i> | <i>n(mol)</i> | <i>mol fraksiyonu</i> |
| 1CH ₄ | 0,07083CH ₄ | 1CH ₄ | 0,0625CH ₄ |
| 2,4O ₂ | 0,17O ₂ | 2,4O ₂ | 0,15O ₂ |
| 10,7175N ₂ | 0,75917N ₂ | 12,599N ₂ | 0,7875N ₂ |
| n_{Toplam} = 14,117 | 1 | n_{Toplam} = 15,999 | 1 |

Tablo 1. Farklı O₂ konsantrasyonları için mol fraksiyonları

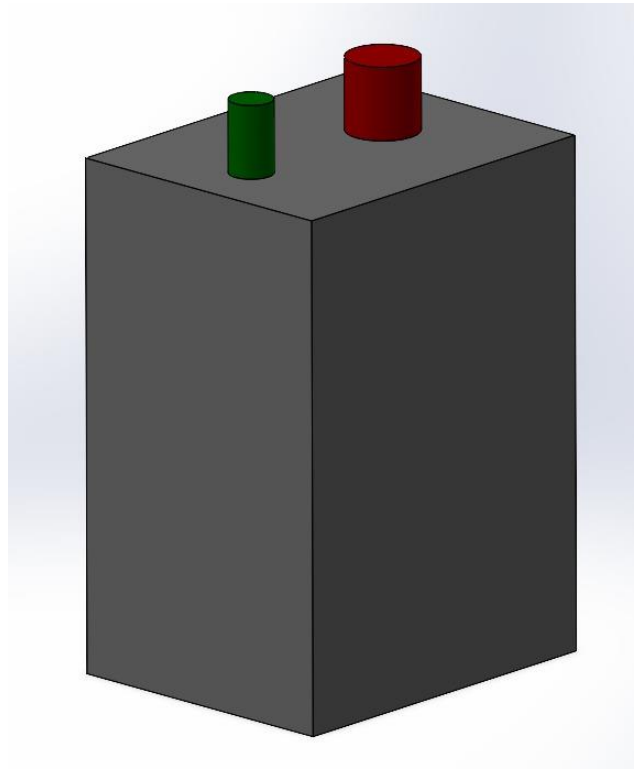
2.1. Yanma Odası

Modellemelerin gerçekleştirildiği yanma odasının teknik resmi ve 3 boyutlu görünüşü Şekil-1 ve Şekil-2'de gösterilmiştir. Yanma odası dikdörtgen bir yapıda olup, uygulamadaki yanma odaları (örneğin gaz türbinleri) için daha silindirik bir yapıda tasarım yapılabilecek olsa da literatür karşılaştırması yapılabilmesi için bu çalışma kapsamında bu tipte bir yanma odasının çalışılmasına karar verilmiştir. Silindirik yapıda bir yanma odasının da modellemesi yapılabilir. Bu durum, sonuçlar kısmında görülecek bölgesel resirkülasyonların önüne de geçebilir.

Yanma odasının 70 mm yüksekliği ve bu yüksekliğe ek 10 mm yakıt girişi ve egzoz çıkış bölümü bulunmaktadır. 3 boyutlu çizimde görüleceği üzere yeşil olarak renklendirilmiş olan yakıt girişi için çap 6 mm ve kırmızı olan çıkış bölümünün çapı ise 10 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Giriş ve çıkış bölümleri, merkezleri arasında 25 mm uzaklık bulunacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Yanma Odası ön (soldaki), yan (ortadaki) ve üst (sağdaki) görünüş teknik resimleri. Teknik resimdeki tüm birimler milimetre (mm) olarak alınmıştır. [18]



Şekil 2. Yanma Odasının İzometrik Görünüşü [18]

Çalışmada kullanılan yanma odası [18], ilgili referansta kullanılan yanma odası ile benzer olup, bu çalışmada ön-karışimli bir geometrik düzenleme yapılmış ve ısı güç artırılarak gaz türbini ve/veya uçak motoru yanma odalarının ısı yoğunluk çalışma değerleri simüle edilmiştir. Giriş ve çıkış kısmı, Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilen şekilde tasarlanan yanma odasının en önemli özelliklerinden birisi de yüksek iç resirkülasyon sağlayabiliyor olmasıdır. Renksiz dağıtılmış yanma şartları, yanma sonu ürünlerinin dış ya da iç resirkülasyonu (alevsiz yanma) ile başarılı olabilirken, bu çalışma ile bu etki hem iç hem de dış resirkülasyon ile araştırılmaktadır. Çalışmada tasarlanan yanma odası [18] referans alınmış, ön karışimli olacak şekilde yeniden tasarlanmış ve yanma hem iç hem de dış resirkülasyonlu (dış resirkülasyon, N₂ ile seyreltme sayesinde simüle edilmektedir) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekillerde de görüldüğü gibi yanma odası dikdörtgen bir prizma şeklinde, hava-yakıt karışımının gireceği ve çıkacağı iki alan haricinde tamamen kapalı olacak şekilde tasarlanmıştır. Genişliği 50 mm derinliği ise 40 mm'dir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisini daha iyi irdeleyebilmek için yanma odasının alt kısmından itibaren farklı yüksekliklerde (h=15mm, h=30mm, h=45mm ve h=60mm) hayali çizgiler üzerinde yanma ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir.

2.2. Sınır Şartları

Çalışmada yakıt olarak metan, seyreltici olarak N₂ oksitleyici olarak da $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları için hava kullanılmıştır. $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısının seçilmesinin temel sebebi, gaz yakıtların genellikle stokiyometrik yanma şartlarından biraz yüksek hava fazlalık katsayılarında (çoğunlukla 1.1 – 1.3) yakılmasıdır. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı sınır şartı ise, hem hava fazlalık katsayısının etkisini gözlemlemek hem de çalışmanın ana amaçlarından birisi olan gaz türbini yanma şartlarını temsil etmektir (gaz türbinleri genellikle daha yüksek hava fazlalık katsayılarında çalıştırılır. Ancak, havanın önemli bir bölümü yanma odasına gönderilmeyerek soğutma amaçlı kullanılır). Tüm modellemeler için ısı gücü 10 kW (bu yanma odası ölçüleri için ısı yoğunluk yaklaşık 70 MW/m³.atm) ve giriş sıcaklıkları oda sıcaklığı olan 300K seçilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılması için N₂ seyreltici olarak seçilmiş ve yanma odasına girmeden önce, hava bünyesinde belirlenen yüzdelerde karışımı sağlanmıştır. Bu işlem sırasında, çalışma kapsamında belirlenen $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayıları için gerekli O₂ miktarları değiştirilmemiş olup, seyreltici ilavesi ile hava bünyesindeki O₂ konsantrasyonu azaltılmış, bu sayede reaksiyon hızı azaltılarak yanmanın tüm yanma odasına daha uniform bir şekilde yayılması hedeflenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkilerini daha iyi anlayabilmek için, yanma odasının altından itibaren belirlenen yüksekliklerde (h=15mm, h=30mm, h=45mm, h=60mm) çizilen hayali çizgilerin olduğu kısımlardaki yanma sonu sıcaklık emisyon karakteristikleri sonuçlarda sunulmuştur.

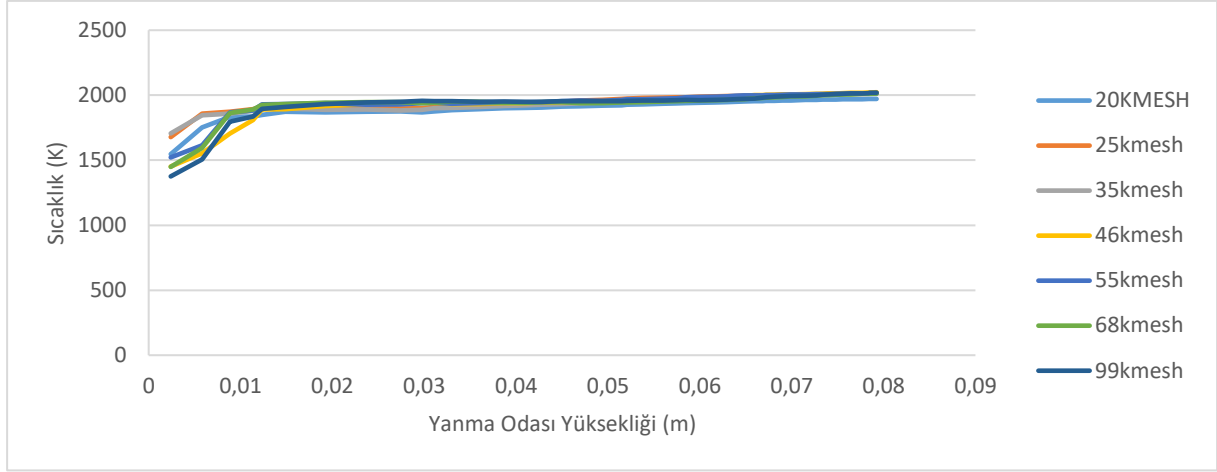
2.3. Modelleme Detayları

Modellemelerin tamamı momentum, kütle, enerji ve türler dahil olmak üzere genel denklemler üzerinden Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı kullanılarak çözümlenmiştir. Yanma modeli için program üzerine varsayılan Eddy Dissipation Concept'e, Chemkin yardımıyla elde edilen GRI-MECH 3.0 reaksiyon basamakları entegre edilmiştir (64 basamak). Türbülans modeli olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Radyasyon modeli için ise 1000 K'den fazla alev sıcaklıklarında hatalı modelleme sonucu almamak için P-1 modeli seçilmiştir. Tüm modellemeler 10 kW ısı gücü (yaklaşık 70 MW/m³.atm'lık ısı yoğunluk) için yapılmıştır. $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ için elde edilen hesaplama sonuçları Tablo-1' de detaylı olarak gösterilmiştir.

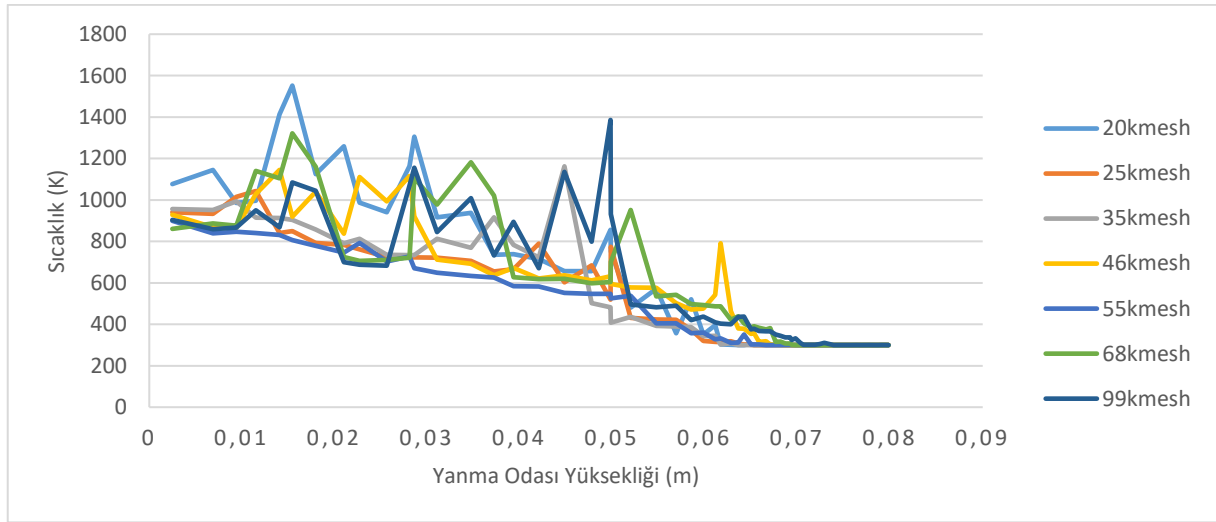
3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

3.1. Ağ Sayısından Bağımsızlaştırma

Modelleme yapılırken gereksiz fazla ağ yapısı ile çalışmak, hem modellemenin yapıldığı bilgisayar gücü açısından sorun olabilmekte hem de zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle de genellikle modelleme çalışmalarında ağ yapısından bağımsızlaştırma yapmak işlemleri daha kolaylaştırmakta ve devam eden modellemeler için zaman kazandırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada da yedi farklı ağ yapısı ile modellemeler gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısından bağımsızlaştırma yapılırken 20000, 25000, 35000, 46000, 55000, 68000 ve 99000 ağ sayılı ağ yapıları kullanılarak ayrı ayrı modellemeler gerçekleştirilmiş ve yanma odası alt kısmından yanma odasına kadar ve yanma odası girişinden yanma odası alt kısmına kadar olan sıcaklık değişim profilleri Şekil 3 ve Şekil-4'te karşılaştırılmıştır. Bu modellemeler sonucunda 55000 ağ sayılı ağ yapısının uygun ve yeterli olacağına karar verilmiştir.



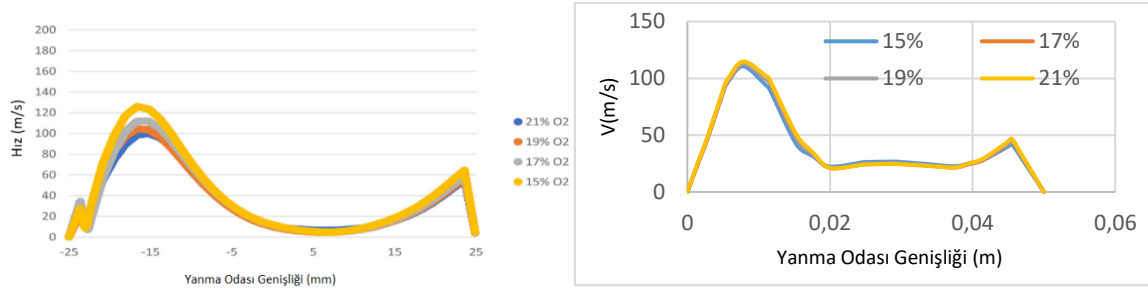
Şekil-3. Yanma Odası Alt Kısmından Çıkış Bölgesine Doğru Ağ Sayısının Etkisi



Şekil-4. Giriş Bölgesinden Yanma Odası Alt Kısmına Doğru Ağ Sayısının Etkisi

3.2. Modelin Doğrulanması

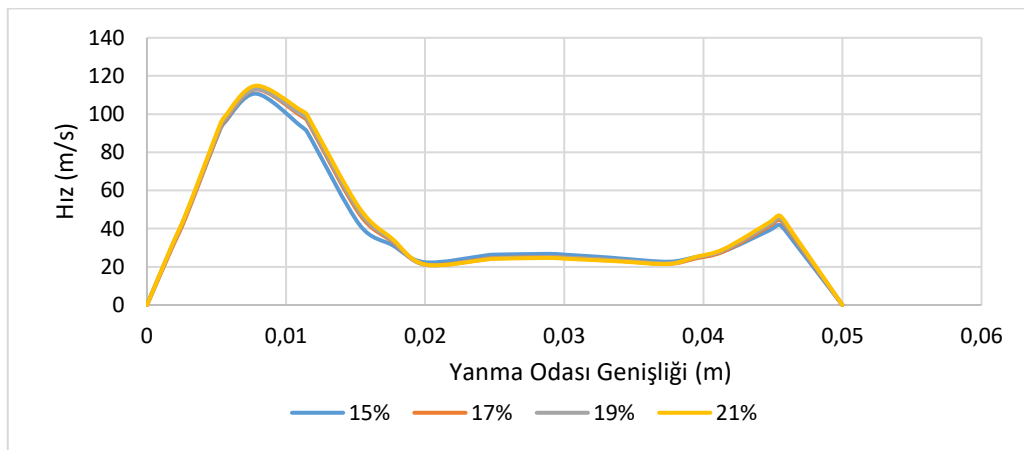
Yanma modellemelerine başlanmadan önce, daha önce yapılmış aynı ya da benzer deneysel ve/veya sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapmak, yapılacak modellemelerin doğrulanması için esastır. Bu amaçla Ilbas vd. [19] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada (bu çalışmada benzer bir yanma odası kullanılmıştır) elde edilen modelleme sonuçları ile bu çalışmadaki modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde yanma ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız dağılım profillerinin birbirine oldukça benzediği, ancak, değerler açısından değerlendirildiğinde ise mevcut çalışma için hız değerlerinin biraz düşük olduğu görülmektedir. Buradaki farklılığın temel nedeninin ise Ilbas vd. [19] tarafından yapılan çalışmadaki yanma odasının ön-karışimsız, mevcut çalışmada kullanılan yanma odasının ise ön karışimli yanma odası olması ve bu nedenle yanma odası içerisindeki jet momentumlarının az da olsa farklı olmasıdır.



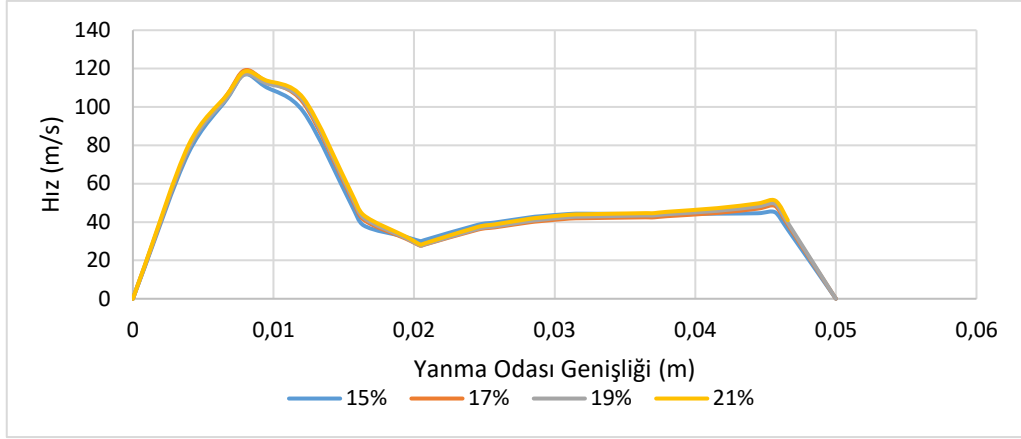
Şekil-5. Referans çalışma (soldaki) [19] ile mevcut çalışma [sağdaki] modelinin doğrulanması

3.3. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

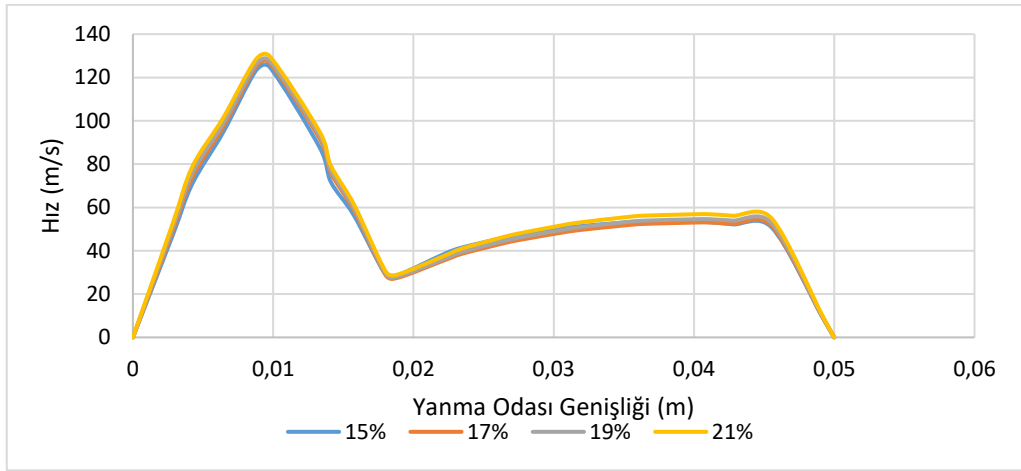
Hava fazlalık katsayısının $\lambda=1.2$ olarak alınması ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarının uygulanması sonucu elde edilen bulguların ilkinde yanma sonu ürünlerinin yanma odasındaki dağılımları için hız modelleme sonuçları, farklı yükseklikler için ($h=15$ mm, $h=30$ mm, $h=45$ mm ve $h=60$ mm) Şekil 6 ile Şekil 9'da sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, yanma odası giriş kesitine denk gelen 0.01 m genişlikte hız profillerinin değerleri daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Yanma odasının orta bölümlerine ilerlendikçe (0.02 m – 0.04 m), yanma sonu ürünleri çıkışa doğru ilk döngüden dolayı hız profillerinin değerleri, tüm oksijen konsantrasyonları için azalmıştır. Ardından, yanma odası çıkışına doğru yönelen yanma sonu ürünlerinin hızları, yanma odası yüksekliği arttıkça tekrar artarak yanma odasını terk etmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma şartları için hız profilleri değerlendirildiğinde, yanma odası giriş ve çıkış kısımlarında önemli sayılabilecek bir değişiklik olmamıştır. Yanma sonu ürünlerinin hız profillerini daha iyi anlamak için Şekil 10'da hız konturları gösterilmiştir. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu azaldıkça (seyreltici beslendikçe), Şekil 10'da soldan sağa doğru hız değerlerinin arttığı, özellikle de yanma odası çıkış bölgesinde görülmektedir. Şekil 10'da ayrıca, yanma odası çıkış bölgesinde, yanma sonu ürünlerinin bir kısmının, yüksek iç resirkülasyon nedeniyle yanma odası içerisinde doğru resirküle oldukları da anlaşılmaktadır. İç resirkülasyon ile renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasına katkı sağlanmaktadır.



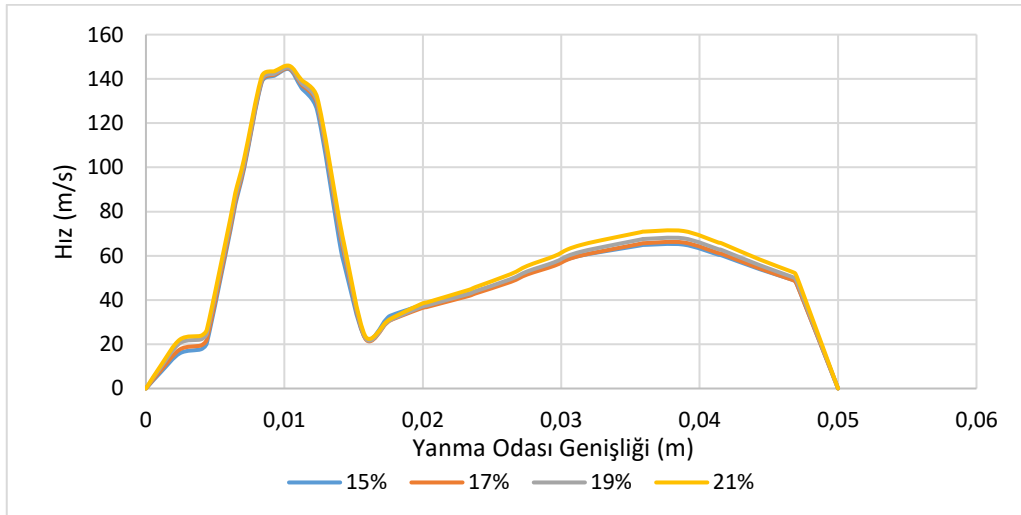
Şekil-6. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



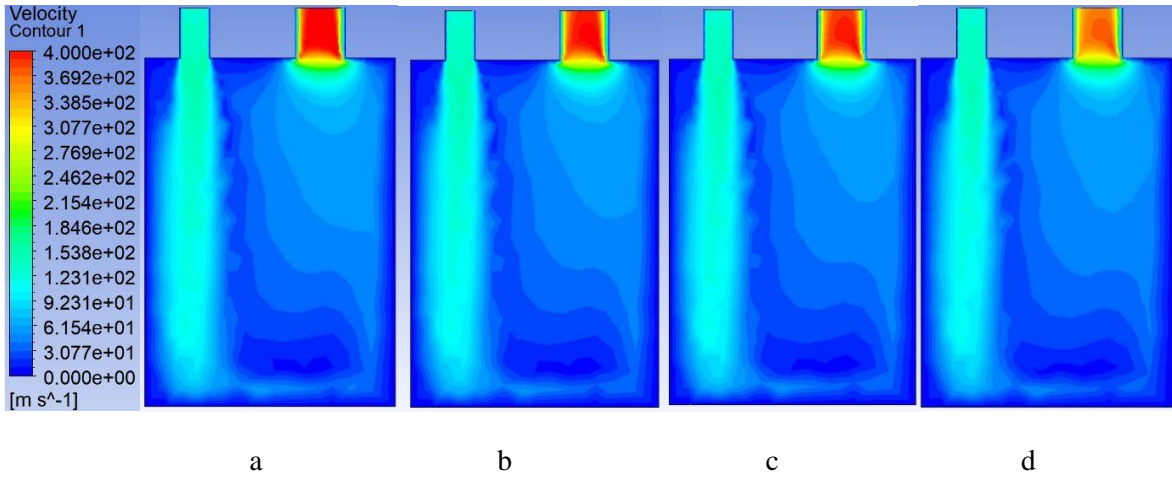
Şekil-7. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil-8. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



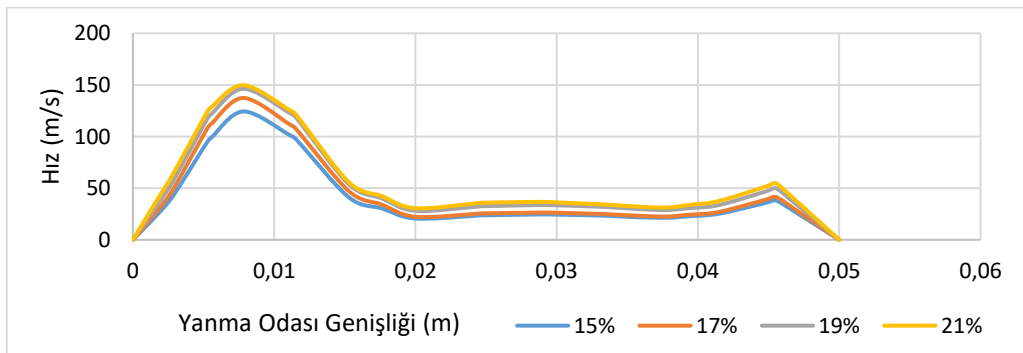
Şekil-9. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



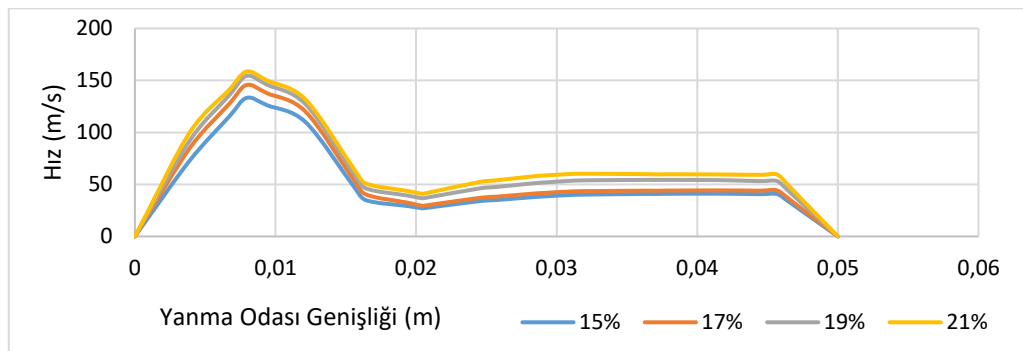
Şekil-10. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

3.4 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

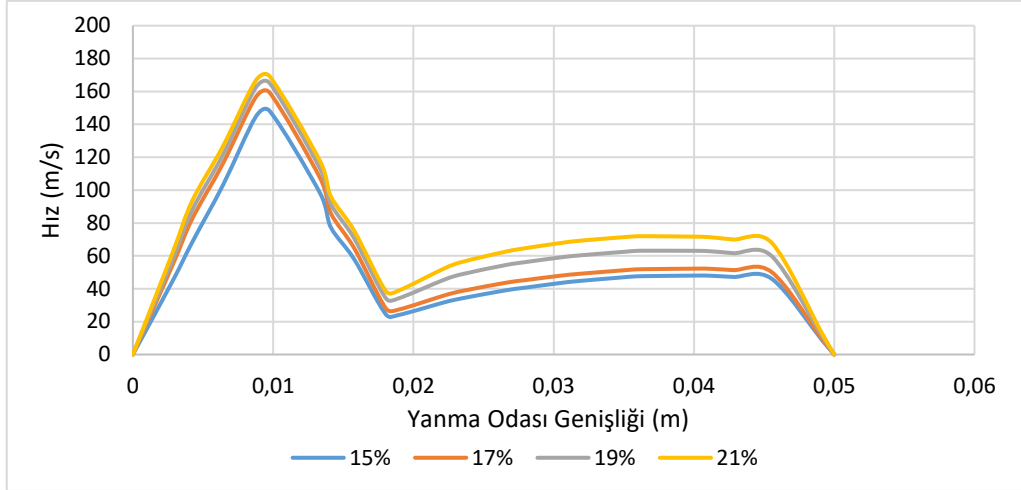
Hava fazlalık katsayısını artırıp, renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulandığında ve elde edilen bulgular yeniden değerlendirildiğinde, yanma odası içerisinde tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin hızlarında, analiz edilen her yükseklik için artışlar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 11 ila Şekil 14). Bu durumun temel nedeninin yanma odasına gönderilen hava-yakıt karışımının debisinin artırılmış olduğu değerlendirilmektedir. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında ise, seyreltici beslenmesinin de etkisiyle yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız değerlerinde belirgin bir artış olmuştur. Şekil 15'te ise yanma sonu ürünlerinin hız profilleri sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisinin yanı sıra iç resirkülasyon etkileri de Şekil 15'te gösterilen yanma sonu ürünlerinin hız konturlarından anlaşılmaktadır.



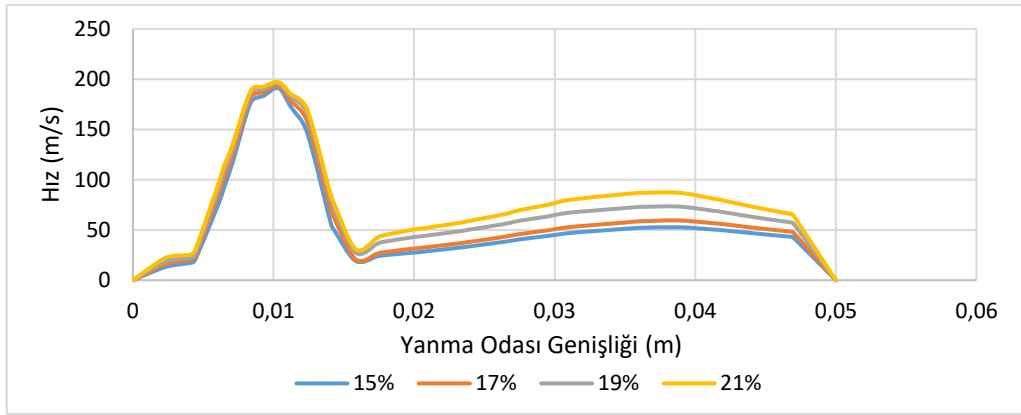
Şekil-11. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



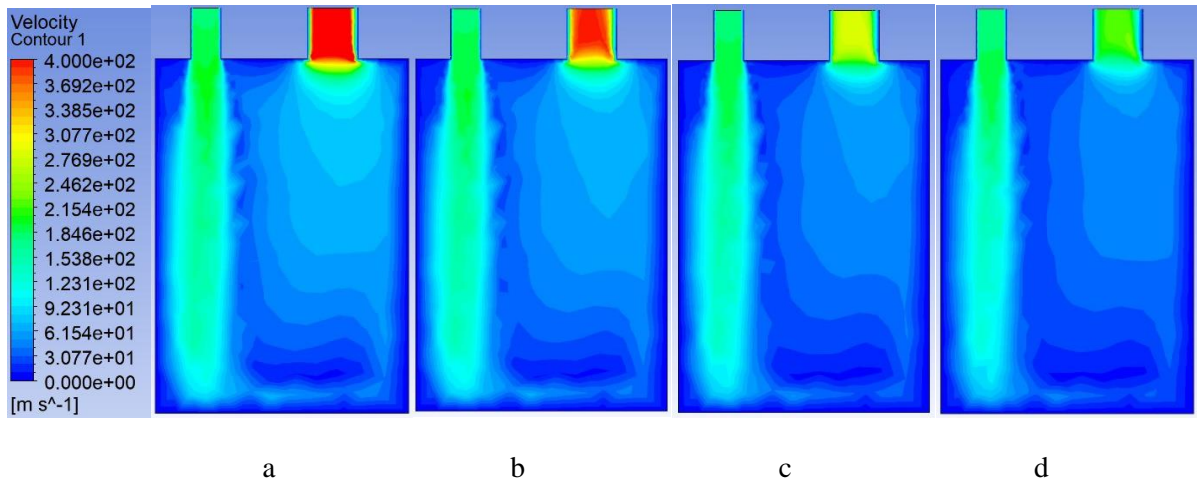
Şekil-12. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil-13. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



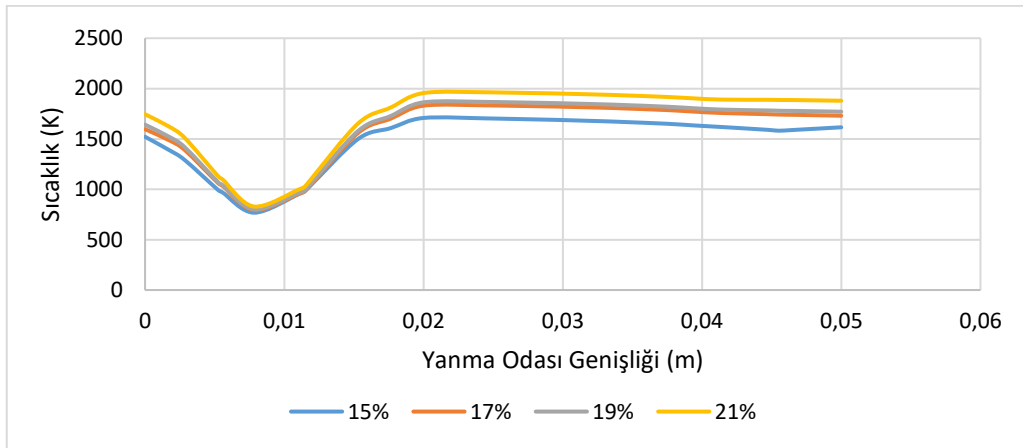
Şekil-14. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



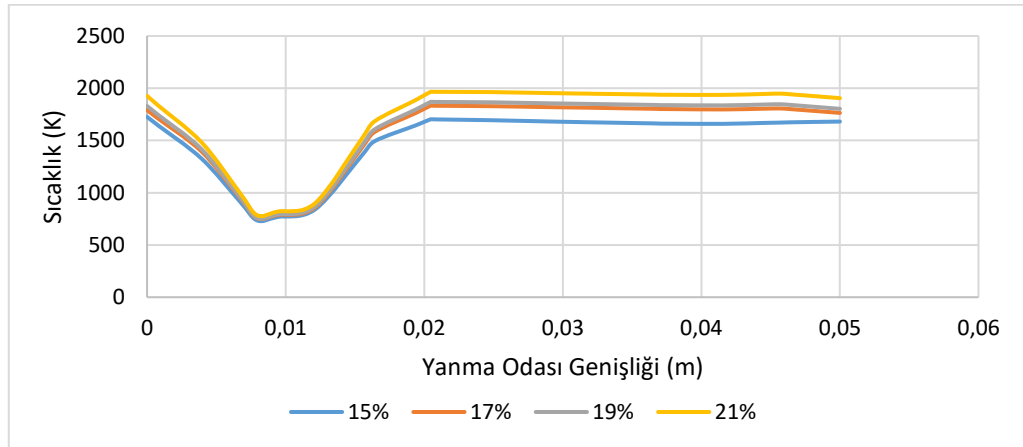
Şekil-15. $\lambda=1.7$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

3.5 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları

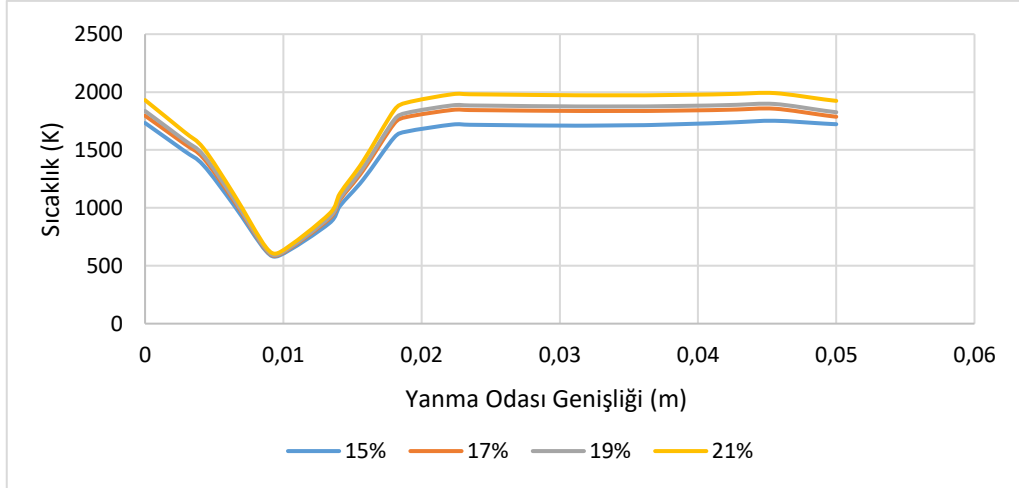
Modellemeler sonucu tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları bu bölümde sunulmuştur. Şekil 16 ila Şekil 19'da farklı yüksekliklerdeki yanma odası genişlikleri boyunca sıcaklık profilleri, konvansiyonel (%21 O₂) ve renksiz dağıtılmış yanma şartları için gösterilmiştir. Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde, yanma odasının tamamı için, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe sıcaklık değerlerinin bir miktar düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumun temel sebebinin, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılabilmesi için yanma odasına beslenen azot seyrelticisinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık değerlerinin, beklenmedik şekilde düşmemesini sağlayan en önemli etken ise, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılırken, stokiyometrik olarak hesaplanan ve gerekli olan, hava bünyesindeki oksijen miktarının değiştirilmemesidir. Burada sağlandığı görünen en temel durum, yanma hızının yavaşlatılması ve yanmanın yanma odasına daha efektif bir şekilde yayılımının başarılmasıdır. Bu sonuç, yanma sonu ürünlerinin sıcaklık konturlarının gösterildiği Şekil 20'den daha da iyi anlaşılmaktadır. Şekil 20'de konvansiyonel yanma (en sağdaki) neticesinde elde edilen sıcaklık konturunda, yanma odasının farklı bölgelerinde bazı farklı sıcaklık değerli bölgeler oluşurken, oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonunun azaltılması neticesinde yanma, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına doğru geçmeye başlamış (sağdan sola) ve %15 O₂ içeren oksitleyici için yapılan modelleme sonuçlarına göre sıcaklık dağılımı oldukça uniform bir görüntü çizmiştir. Bu sonuca göre renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu anlaşılmakla birlikte, kirletici emisyon seviyelerine de bakmak ve onların sonucuna göre değerlendirmek daha doğru olacaktır. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu, alevin sürdürülebilirliği noktasında sorun teşkil edebileceğinden %15'in altına indirilmemiştir.



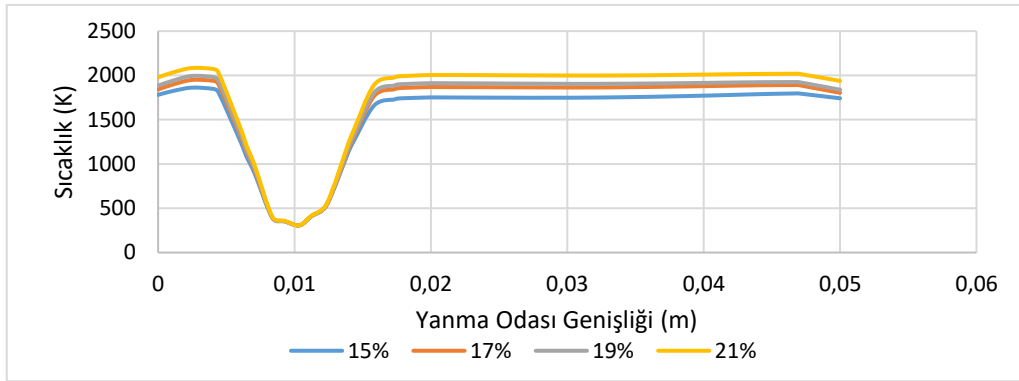
Şekil-16. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



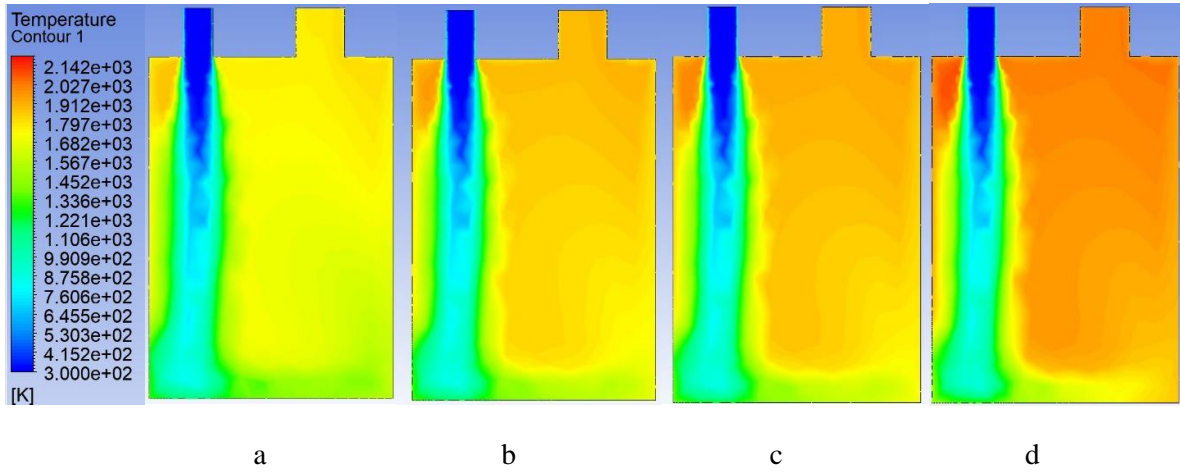
Şekil-17. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil-18. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



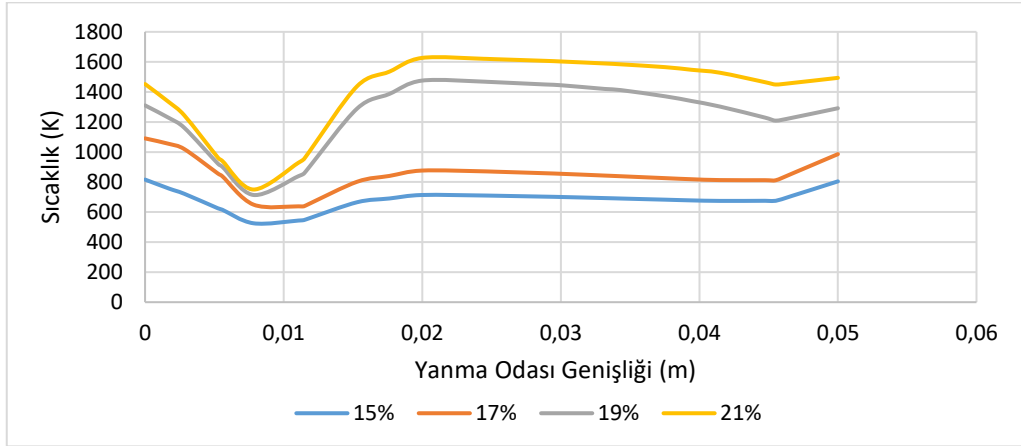
Şekil-19. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



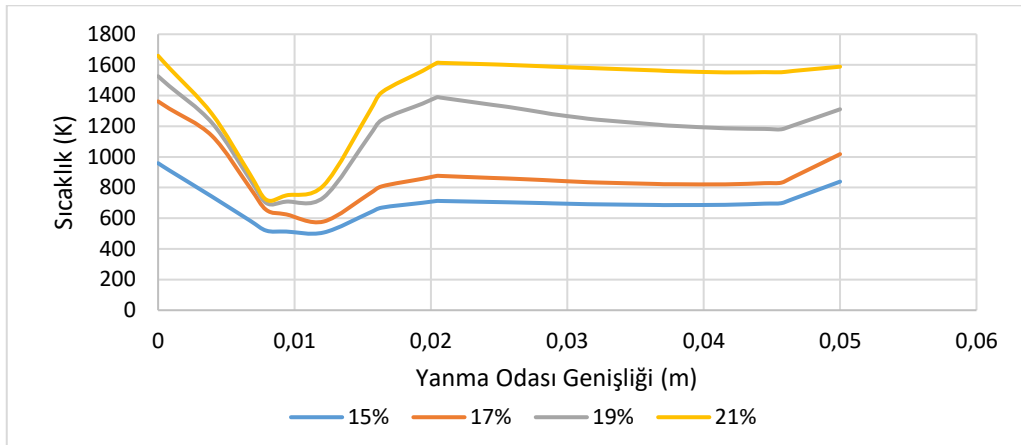
Şekil-20. $\lambda=1.2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği

3.6 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık

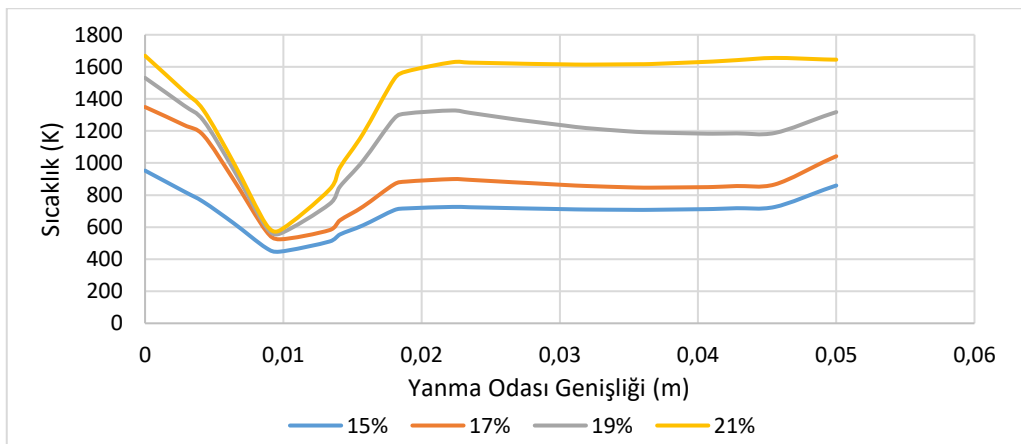
Şekil 21 ila Şekil 24'te 1.7 hava fazlalık katsayısı için tüm yanma şartlarındaki yanma sonu ürünlerinin sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe yanma hızı yavaşlatılmış ve yanmanın tüm yanma odasına yayılımı sağlanmıştır. Bu sonuç Şekil 25'ten de anlaşılmaktadır. Sıcaklık seviyelerinin, bir önceki bölümde sunulan ($\lambda=1.2$) sıcaklık seviyelerinden daha düşük olması, yanma sonu ürünlerinde daha fazla azot bulunmasıdır.



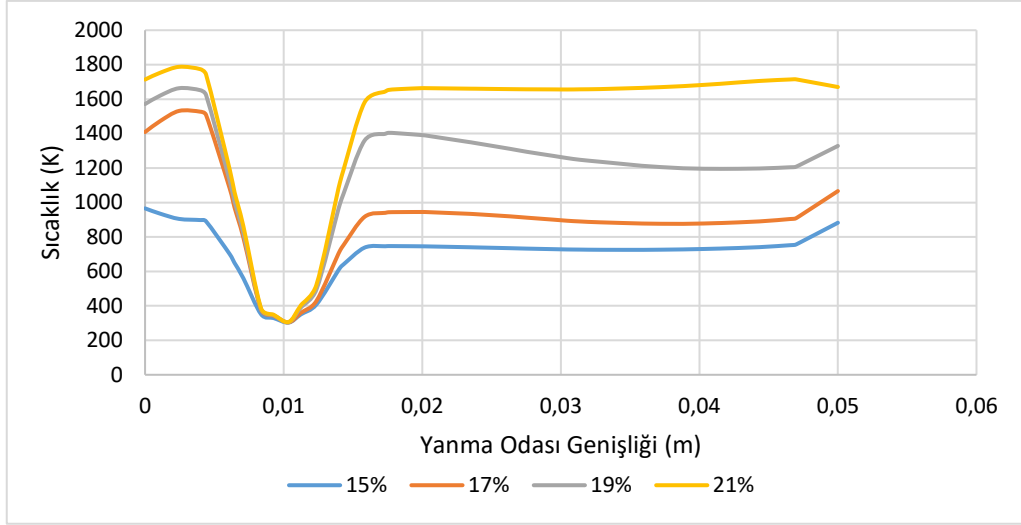
Şekil-21. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



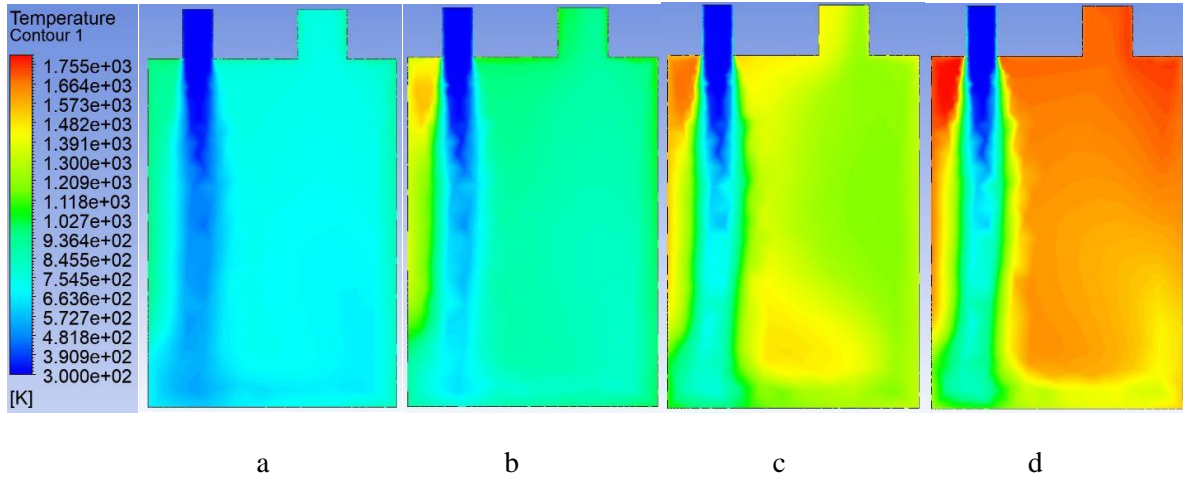
Şekil-22. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil-23. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil-24. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



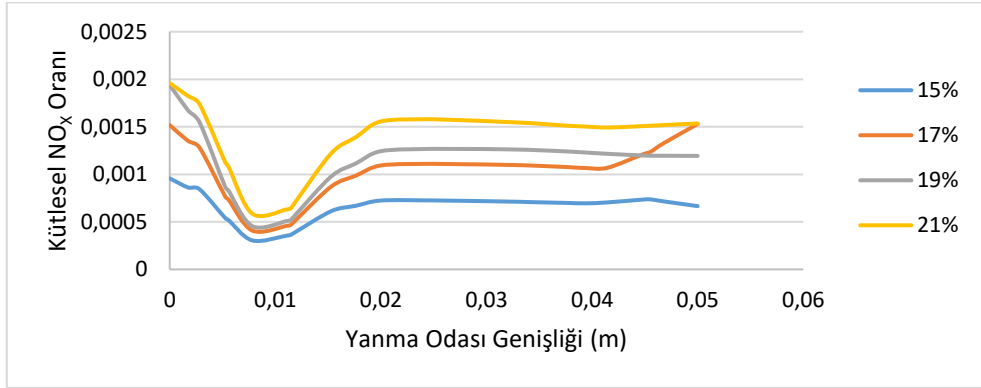
Şekil-25. $\lambda=1.7$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği

Şekil 16 ile Şekil 19 ve Şekil 21 ile Şekil 24 incelendiğinde, yanma odası tüm yükseklik grafikleri için yanma odası genişlik değerinin 0 olduğu bölgedeki sıcaklık değerleri genel olarak yüksektir. Öyle ki, bazı grafiklerde bu değer, yanma odası içerisinde elde edilen en yüksek sıcaklık değerinden daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Bu durumun temel nedeni, hem ön karışımli alev yapısının, yanabilir karışımın merkezinden etrafına doğru alev yapısı oluşturması hem de yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odası kullanımı ile yanma sonu ürünlerinin yanabilir yakıt-hava karışımına doğru resirküle edilmesidir.

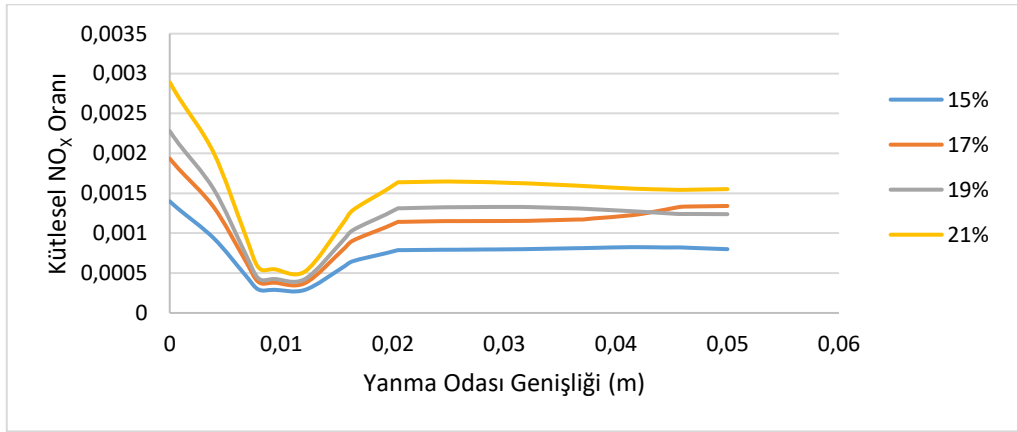
3.7 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

Renksiz dağıtılmış yanmanın önemli başarı kriterlerinden biriside, renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması, bu sayede, yanma odası içerisinde gelişmesi muhtemel, bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasının engellenmesi ve bunun sonucunda da yanma sonu NO_x kirlenici emisyonlarının önemli derecede azaltılmasıdır. Buradaki ana kriter, ısıl NO_x oluşumunun önemli ölçüde baskılanmasıdır. Şekil 26 ile Şekil 30 yanma sonu NO_x kirlenici emisyon profillerini ve NO_x konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli NO_x oranlarının konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılıdır. Kütleli NO_x oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Önceki bölümde verilen sıcaklık profilleri ile NO_x profilleri karşılaştırıldığında ise, önemli sayılabilecek düzeyde benzerlik bulunmaktadır. Isıl NO_x' un, özellikle 1000 K sıcaklıkların üzerindeki sıcaklıklarda daha baskın hale gelmeye başladığı

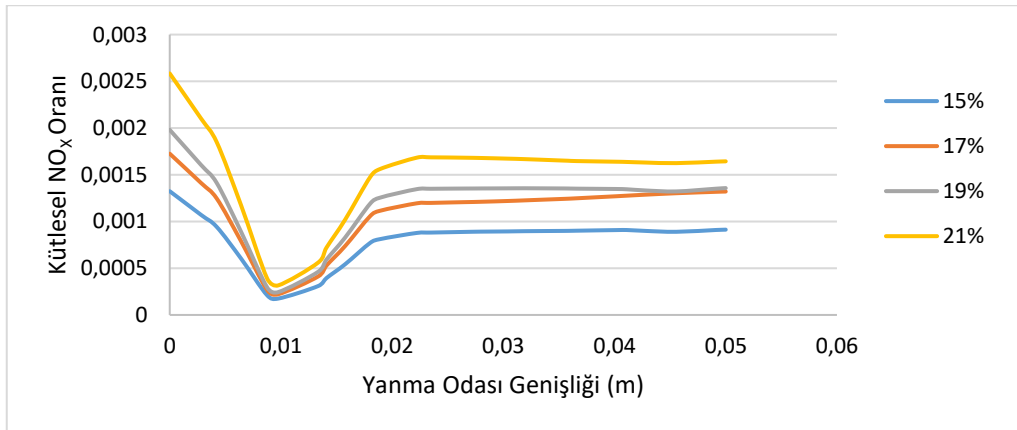
düşünüldüğünde, NO_x oluşum seviyelerinin, 0.01 m'lik yanma odası genişliğinde 0 değerlerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.



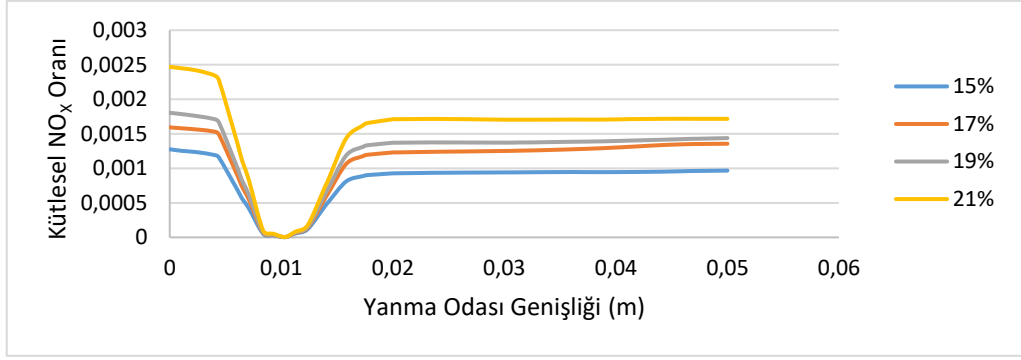
Şekil-26. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



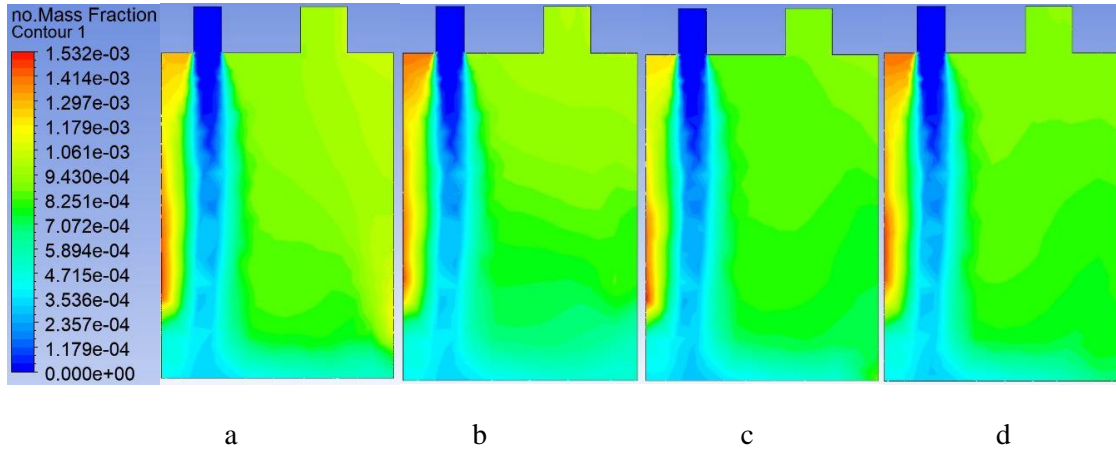
Şekil-27. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil-28. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



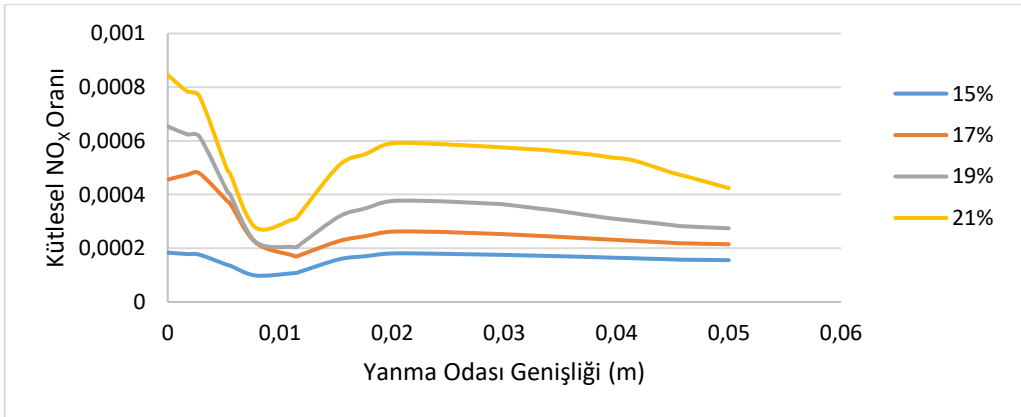
Şekil-29. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



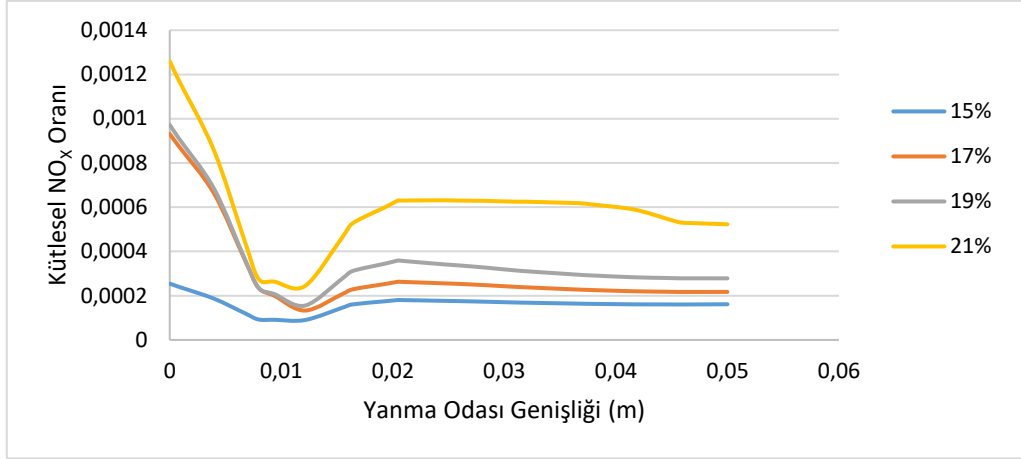
Şekil-30. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

3.8. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

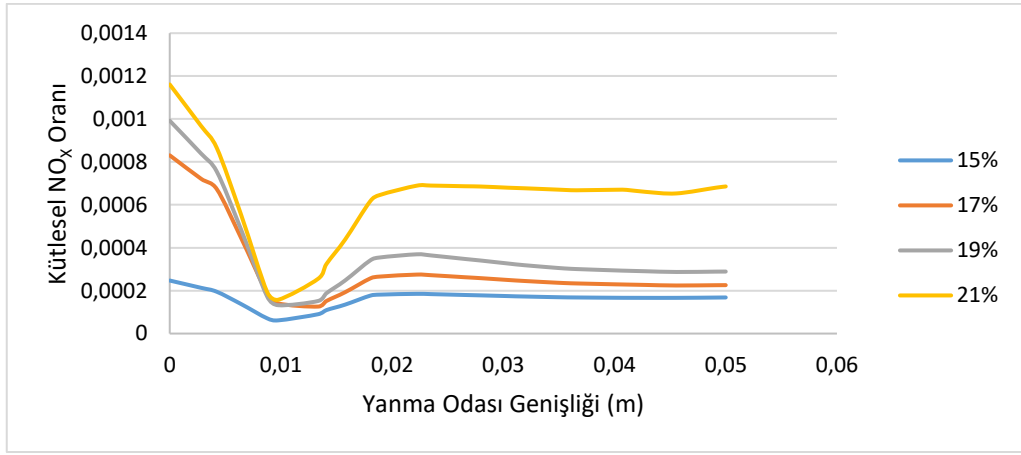
Yanma sonu NO_x kirlenici emisyonlarına hava fazlalık katsayısının artırılma etkileri bu bölümde incelenmiş ve tahmin sonuçları Şekil-31 ile Şekil-35 NO_x profil grafiklerinde ve konturlarında sunulmuştur. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı için yapılan modelleme tahmin sonuçlarına göre, $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen kütleli NO_x oranlarının daha da azaldığı tespit edilmiştir. $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen sıcaklık tahmin sonuçları ile paralel profillerin, yanma hızının azaltılması ve buna bağlı olarak bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılmasıyla, oluştuğu ve bunun sonucunda oksitleyici bünyesindeki oksijen oranı azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarıldığı tahmin edilmiştir.



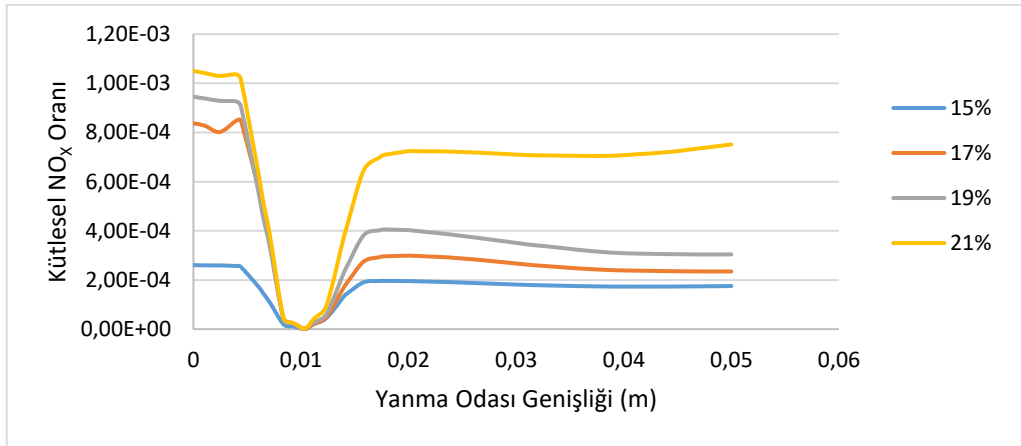
Şekil-31. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



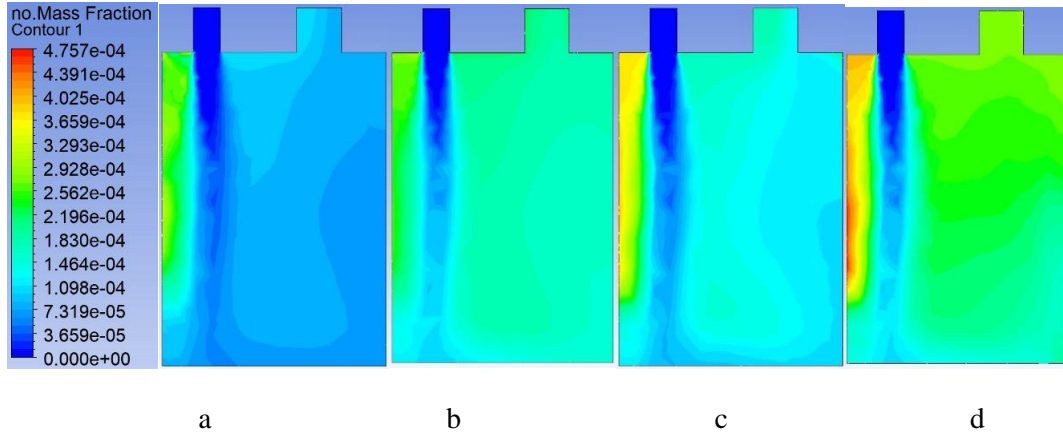
Şekil-32. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil-33. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



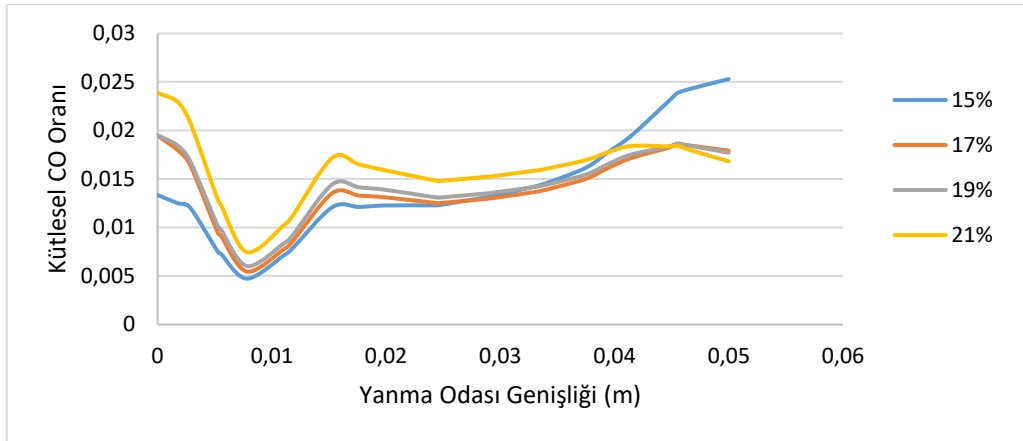
Şekil-34. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



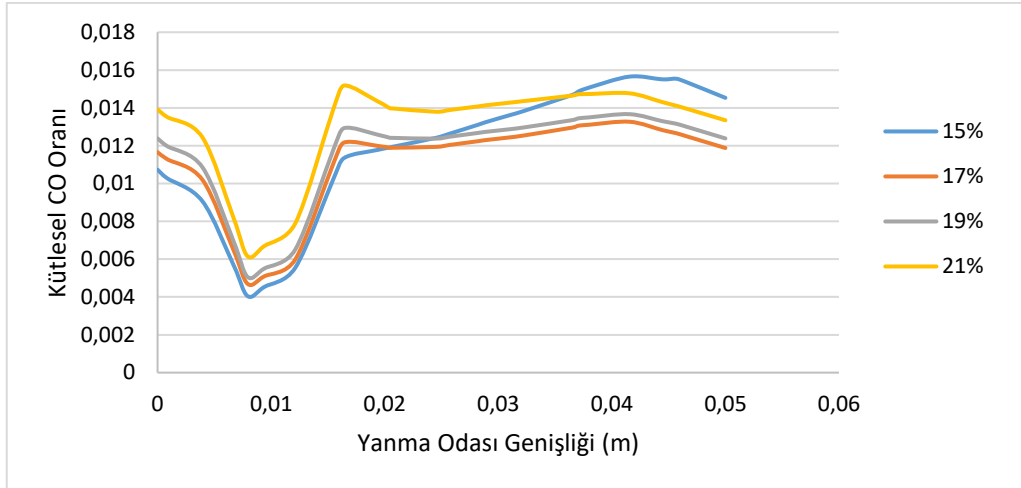
Şekil-35. $\lambda=1.7$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

3.9 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

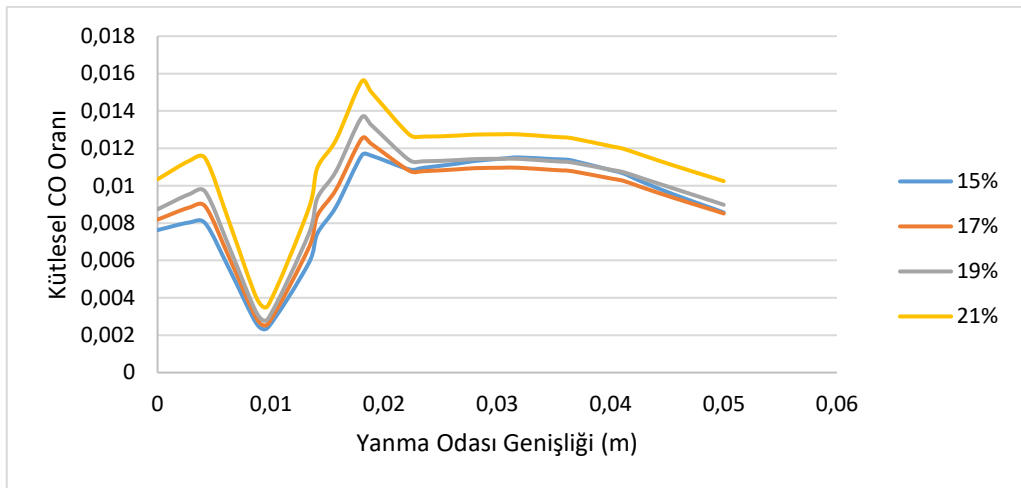
Renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için diğer önemli bir gösterge de, yine renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması sayesinde yanmanın tüm yanma odasına yayılmasına olanak sağlanması, bu sayede, eksik yanma ürünlerinin (örneğin CO) yeniden yakılmasına olanak sağlanmasıdır. Şekil 36 ile Şekil 40 yanma sonu CO kirlenici emisyon profillerini ve CO konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli CO seviyelerinin büyük oranda konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılı olduğunda kütleli CO oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasındaki önemli kriterlerden birisi, oksitleyici bünyesindeki oksijen oranının azaltılması iken diğer önemli bir husus da yüksek iç resirkülasyonlu yanma odasının (gaz türbinlerinde başarılmak istenen şekilde) kullanılmasıdır. Bu sayede, CO eksik yanma ürünü yanma odasına resirküle edilebilmiş ve CO emisyon seviyeleri yüksek değerlerde oluşmamıştır.



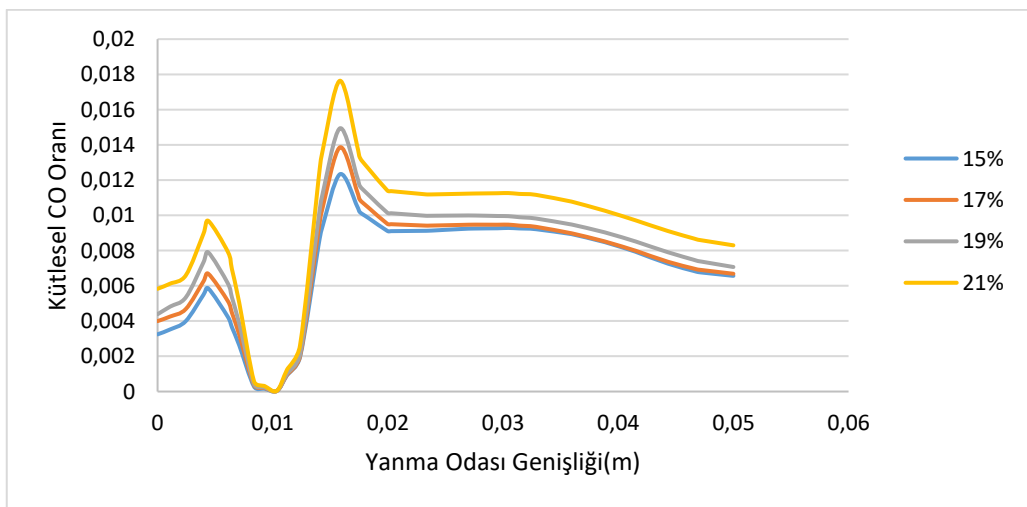
Şekil-36. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



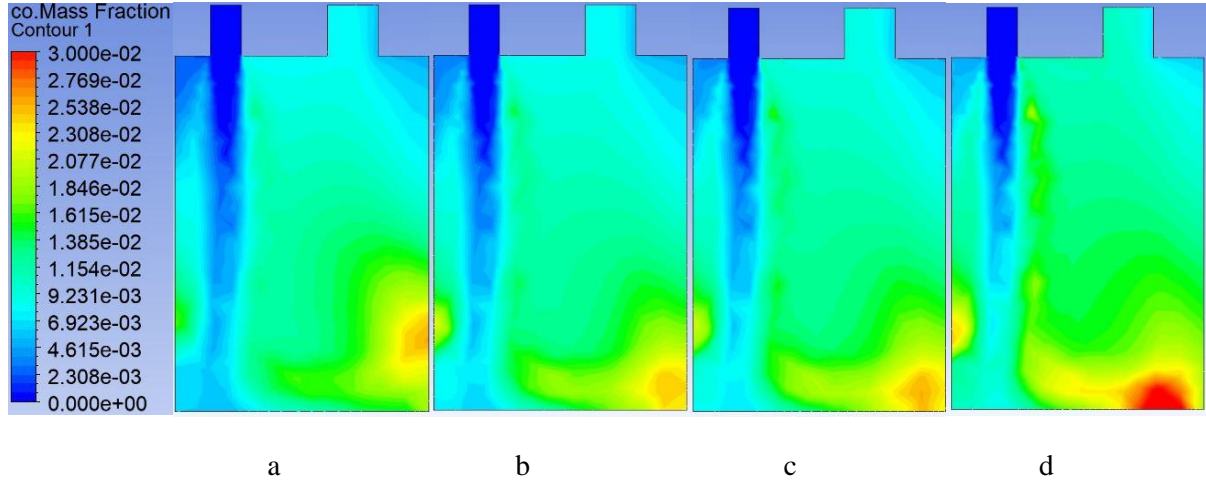
Şekil-37. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil-38. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



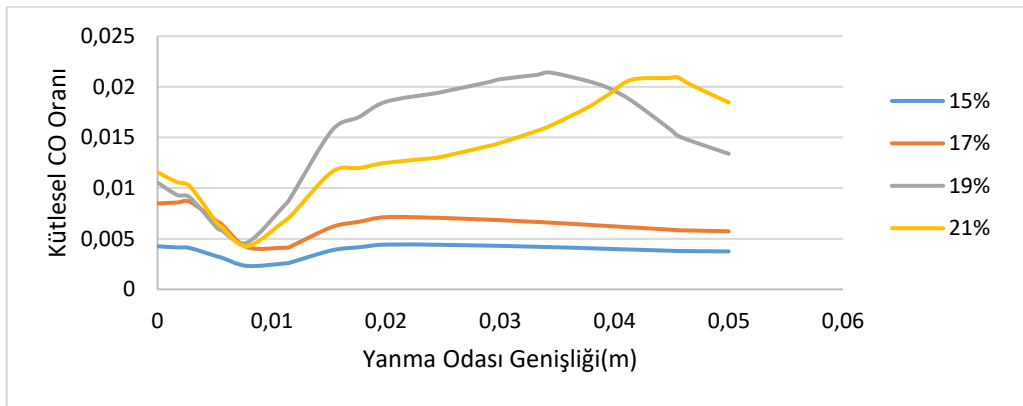
Şekil-39. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



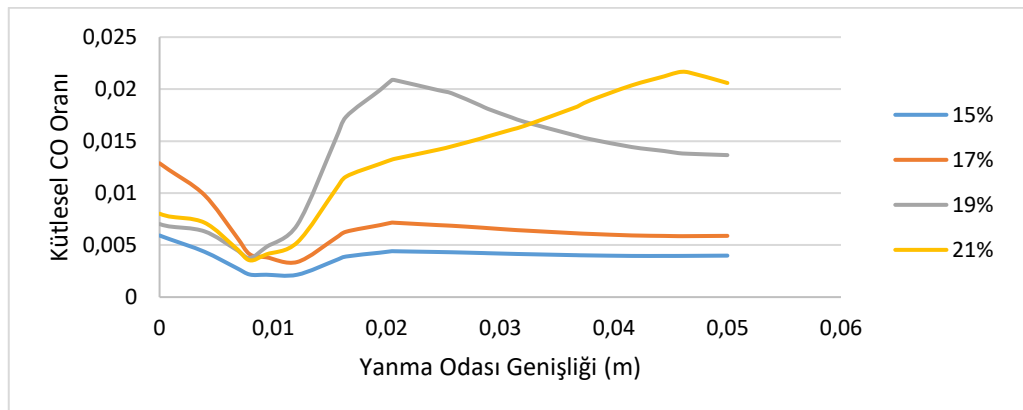
Şekil-40. $\lambda=1.2$ için ($a= \%15$, $b= \%17$, $c= \%19$, $d= \%21$) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

3.10. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

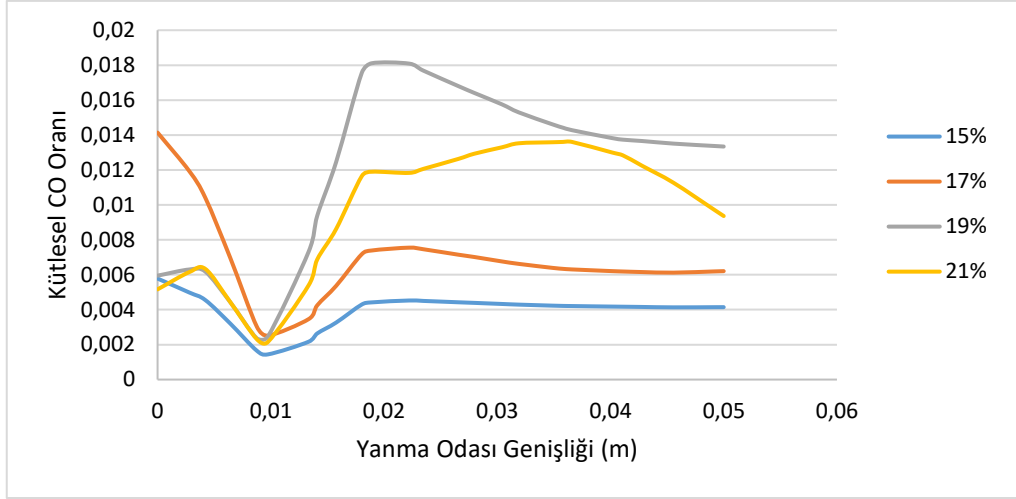
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte yakıt-oksitleyici karışımındaki azot oranı artırılmış, buna karşın yüzde karbon oranı azalmıştır ve bunun sonucu Şekil 41 ilan Şekil 45'te tahmin edilen CO profilleri ve konturlarında sunulmuştur. Yanma odası içerisinde neredeyse tüm bölgelerde $\lambda=1.2$ hava fazlalık katsayısı için tahmin edilen CO seviyelerine göre önemli bir değişiklik olmamakla beraber bir miktar düşüş olduğu da gözlemlenmiştir.



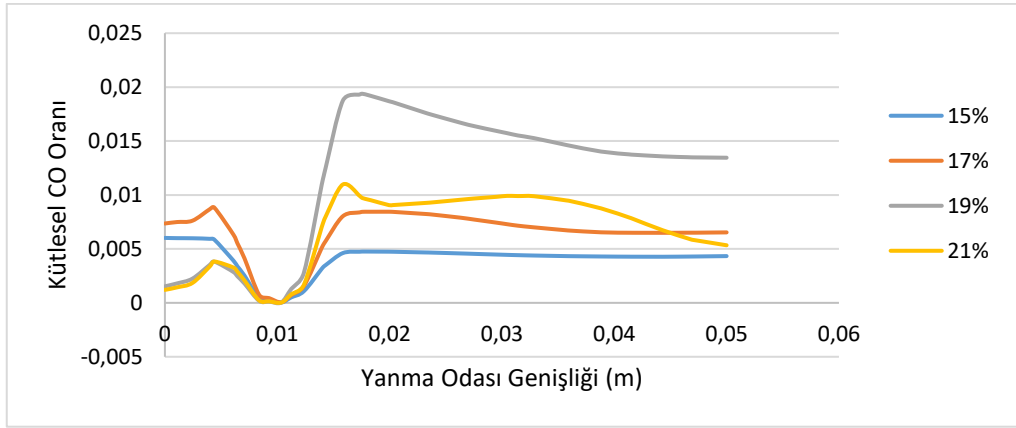
Şekil-41. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



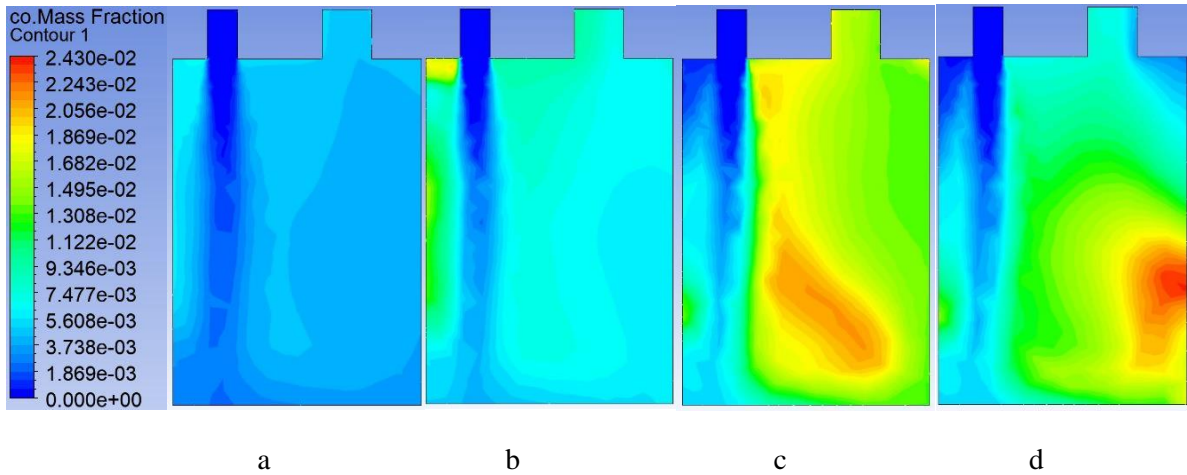
Şekil-42. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil-43. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



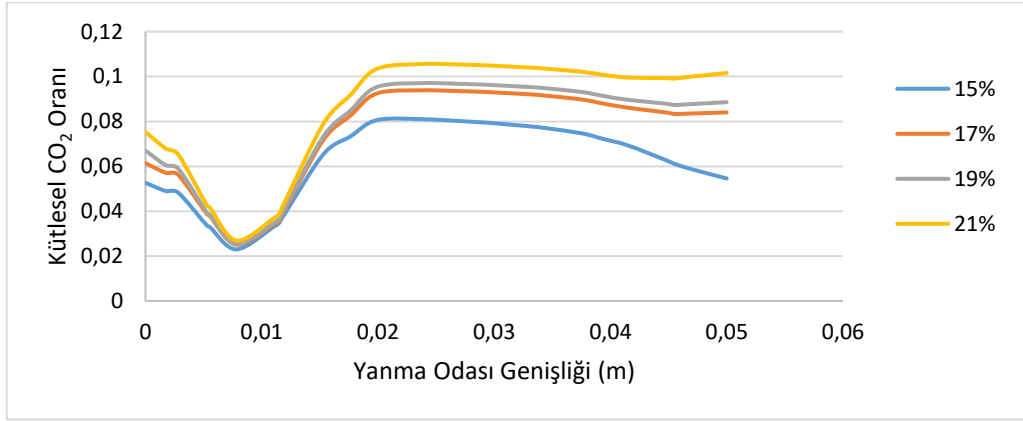
Şekil-44. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



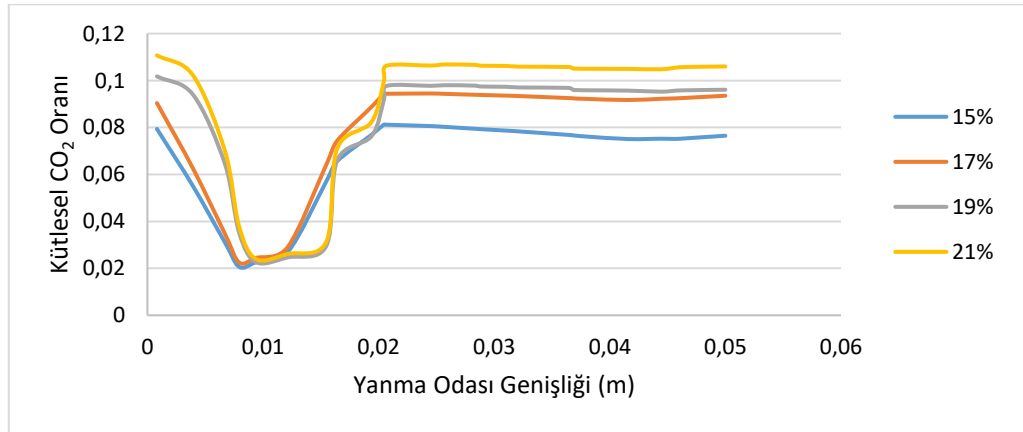
Şekil-45. $\lambda=1.7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

3.11. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

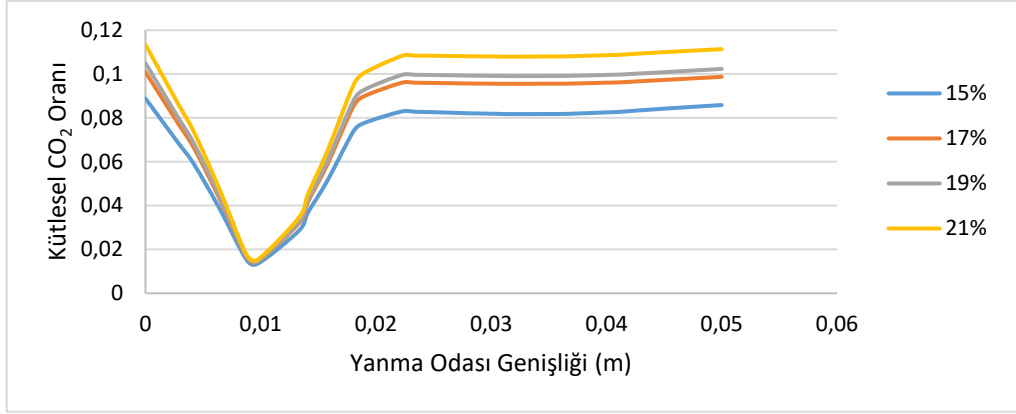
Yanma ve emisyon karakteristiklerinin araştırıldığı çalışmalarda CO₂ emisyonlarını değerlendirmek ve sonuçlarını ortaya koymak önem arz etmektedir. CO₂, küresel ısınmaya neden olan en önemli yanma sonucu emisyonlarından birisidir ve seviyelerinin azaltılması da oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda Şekil 46 ile Şekil 50'de yanma CO₂ emisyon profilleri ve konturları sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçiş sağlandıkça CO₂ seviyelerinin azaldığı ilgili şekillerden anlaşılmaktadır. Bir önceki bölümde yanma sonucu CO emisyonlarının azaldığı belirtilmişti. Bunun sonucu olarak CO₂ emisyonlarının da artması beklenmektedir (CO emisyonlarının CO₂'ye dönüşme hızlarının arttığı anlamına gelir). Buna karşın, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için gerekli seyreltici azotun beslenmesi ile birlikte, karışımda ve bunun sonucunda da yanma sonucu ürünlerinde karbon içerikli ürünlerin kütsel oranlarının da azalmasını beklemek şaşırtıcı olmayacaktır. Şekil 46 ile Şekil 50 değerlendirildiğinde, beslenen seyreltici etkisinin, CO' dan CO₂'ye dönüşen emisyon seviyelerinden daha baskın olduğu ve bunun sonucunda da renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, kütsel CO₂ oranlarının azaldığı sonucunun ortaya çıktığı değerlendirilmektedir.



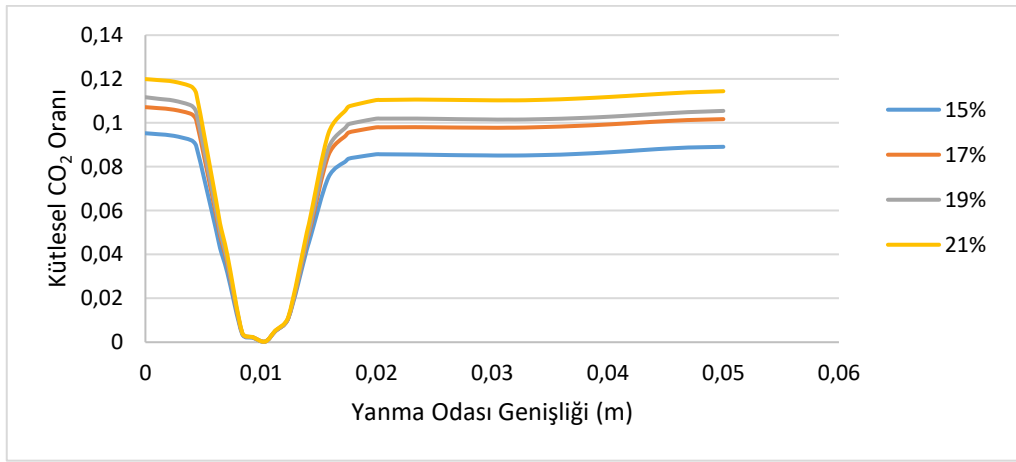
Şekil-46. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



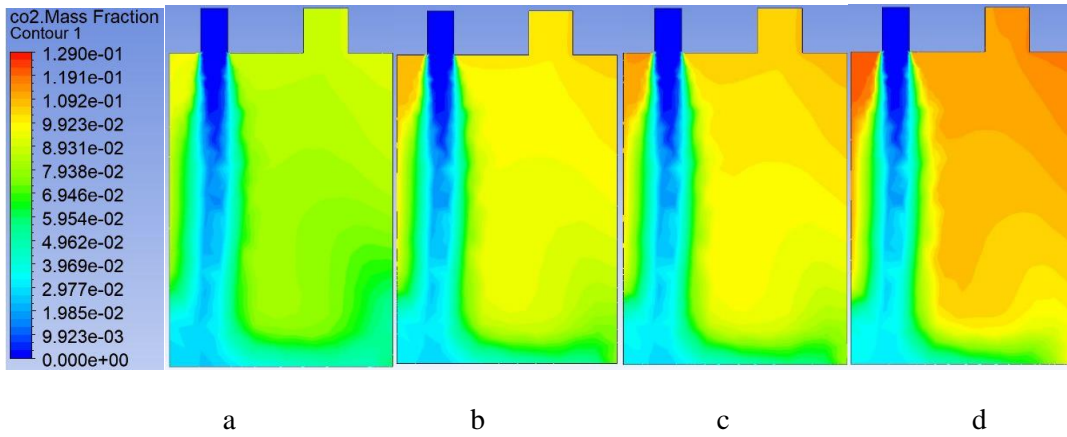
Şekil-47. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil-48. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



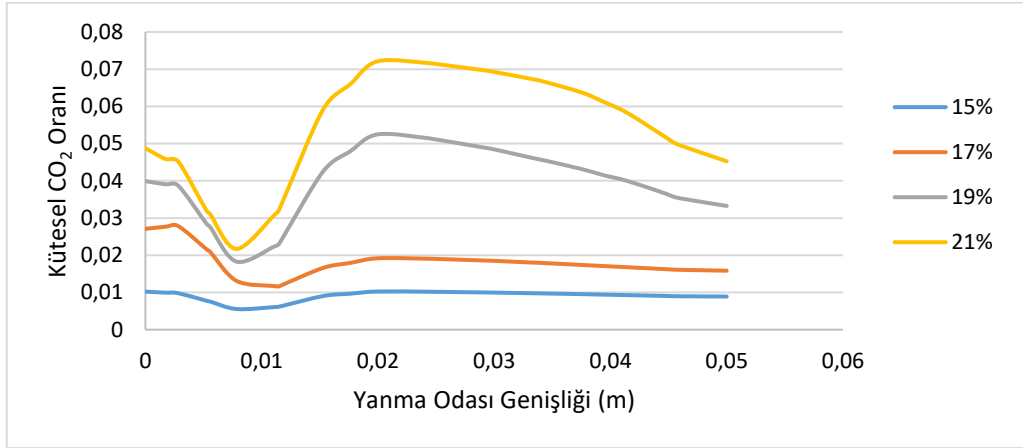
Şekil-49. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



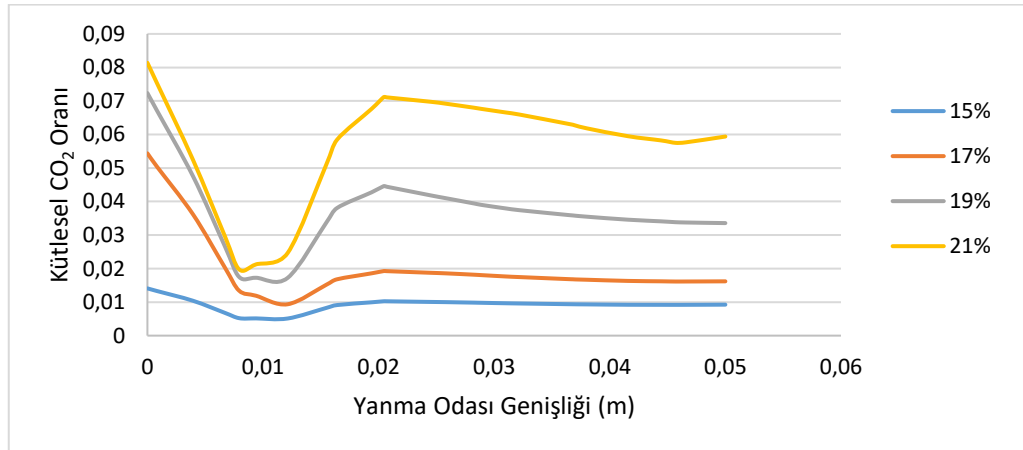
Şekil-50. $\lambda=1.2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

3.12. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

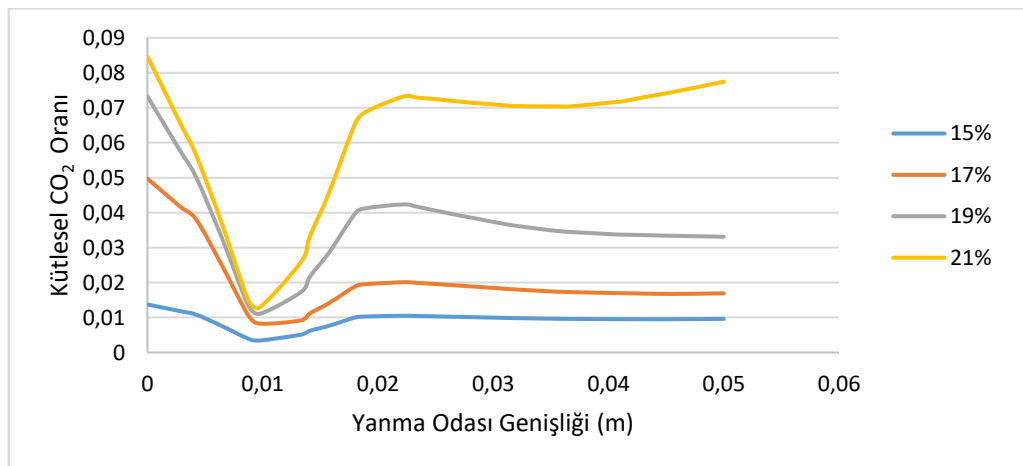
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte CO₂ emisyon seviyelerinin azaldığı Şekil 51 ile Şekil 55'ten anlaşılmaktadır. Yakıt-oksitleyici karışımı bünyesinde azot oranının artması, yanma sonucu ürünlerindeki karbon içerikli emisyonların azalmasına da olanak sağlamış ve CO₂ seviyeleri hem konvansiyonel hem de renksiz dağıtılmış yanma şartları için azalmıştır.



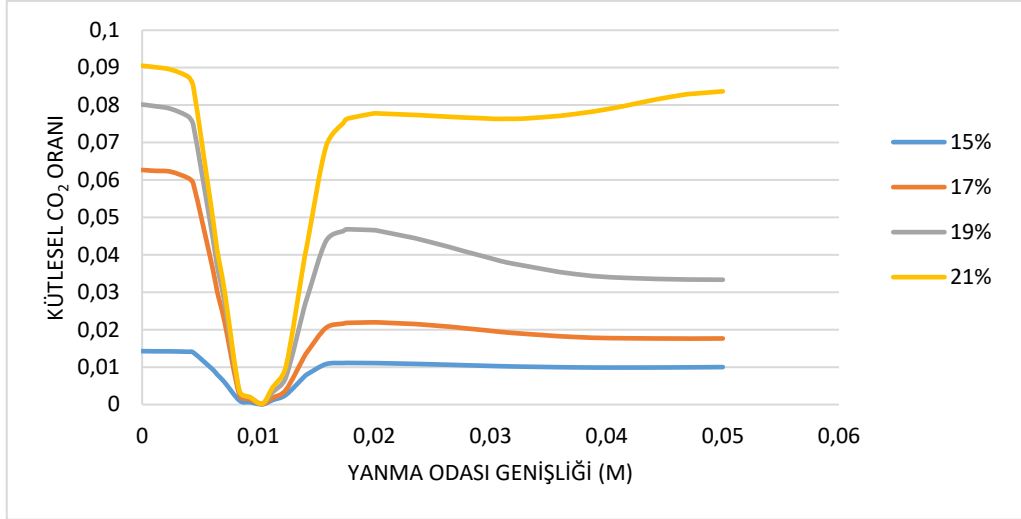
Şekil-51. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



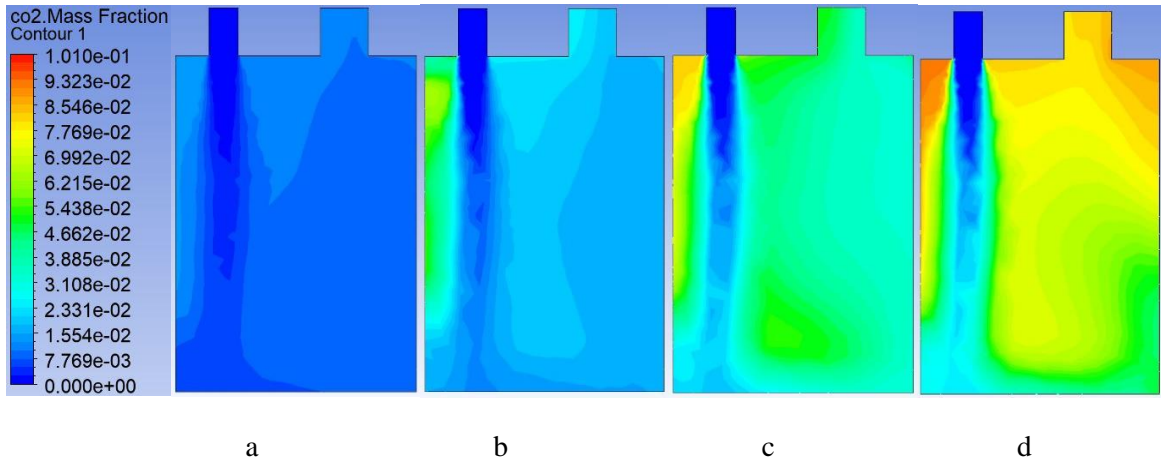
Şekil-52. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil-53. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



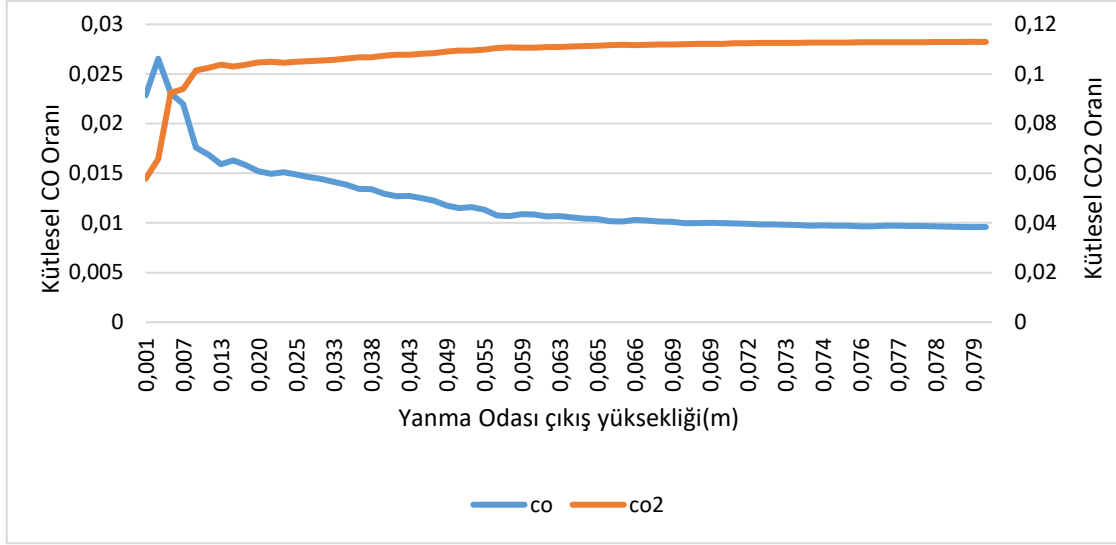
Şekil-54. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



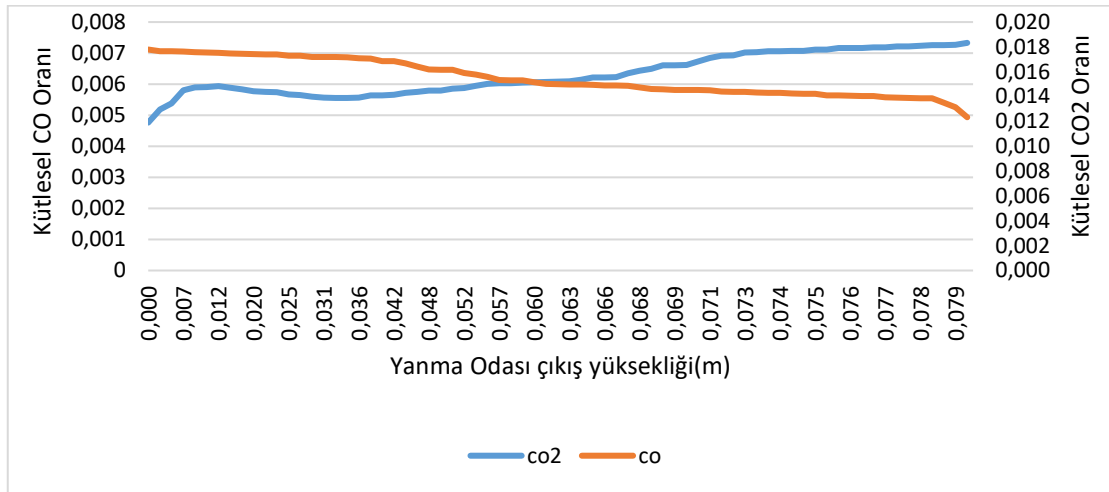
Şekil-55. $\lambda=1.7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

3.13 Çıkış Bölgesi için CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması

Şekil 56 ve Şekil 57’de, % 21 oksijen konsantrasyonu içeren oksitleyici için $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık sayılarında gerçekleştirilen modellemeler neticesinde, yanma odası çıkış kesitine dik ve yanma odasının alt kısmına kadar çizilen hayali, yanma odası çıkış yüksekliği çizgisi için kütleli CO ve CO₂ oranlarının değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere yanma odası çıkışına doğru (yanmanın sonlanmaya başladığı bölgede) yanma sonu CO emisyonları azalırken CO₂ emisyonlarında artış tahminleri ortaya konulmuştur



Şekil-56. $\lambda=1.2$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması



Şekil-57. $\lambda=1.7$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması

4. BULGULAR

Bu çalışmada, ön karışımli, yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında, doğalgazın önemli bir bölümünü oluşturan metan yakıtının yanma ve emisyon parametreleri, $\lambda=1.2$ ve $\lambda=1.7$ hava fazlalık katsayılarında, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartları altında sayısal olarak incelenmiştir. Yanma modellemelerinden daha doğru sonuç alınabilmesi için 64 basamaklı metan yanma reaksiyonları oluşturulmuş ve modellemelerin yapıldığı ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programına entegre edilmiştir. Çalışma, 10 kW ısıl güçte, uygulamada kullanılan gaz türbinleri için uygun olabilecek bir ısıl yoğunlukta (yaklaşık 70 MW/m³.atm) gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %15'e azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu, bu sayede odası içerisindeki sıcaklık seviyeleri bir miktar azalırken daha homojen bir dağılım elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Hava fazlalık katsayısının artırılmasıyla sıcaklık seviyelerinin biraz azaldığı tespit edilmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma odası içerisindeki bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ve bunun sonucunda ısıl NO_x'un baskılanması ile yanma sonu kirletici NO_x emisyonlarında düşüş gözlenmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, hem yanma hızının yavaşlaması ile yanmanın tüm yanma odasına yayılması hem de yüksek resirkülasyon sayesinde yanmamış CO'lerin yeniden yanabilmesi ile yanma sonu kirletici CO emisyon seviyelerinde düşüş gözlenmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma sonu CO₂ emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. CO seviyelerinin azalması ile CO₂ seviyelerinde artış beklenirken, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılabilmesi için beslenen seyreltici azot seviyelerindeki artış daha baskın gelmiş ve kütleli CO₂ oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Tüm bulgular değerlendirildiğinde, en uygun çalışma şartları için hava fazlalık katsayısının 1.2 ve %15 O₂ konsantrasyonu içeren oksitleyici yanma şartları için hem sıcaklık hem de emisyonlar bakımından sağlandığı tespit edilmiştir.

Çalışma neticesinde, gaz türbini ya da bir uçak motoru yanma odasını temsilen yüksek ısıl yoğunluklu ve yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında renksiz dağıtılmış yanmanın uygulanmasının sağlayacağı avantajlar ortaya konulmuştur. Gaz türbinlerinin ve uçak motorlarının yanma odası çıkış sıcaklıklarının önemi değerlendirildiğinde, renksiz dağıtılmış yanma tekniğinin, yanma odası sıcaklık seviyelerini önemli derecede azaltmadığı, buna karşın kirletici emisyon seviyelerini önemli derecede düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, farklı yakıtlara da (örneğin, JP-8 veya diğer uçak yakıtları) bu yöntem uygulanabilir ve uygulama alanları daha genişletilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın her anında bana destek olan ve yönlendirmeleriyle başarılı bir şekilde tamamlamamı sağlayan değerli hocam Serhat KARYEYEN' e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] “When Fossil Fuels Run Out, What Then?”, *MAHB*, 23 Mayıs 2019. <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/> (erişim 22 Mayıs 2022).
- [2] “International Energy Outlook 2016”, s. 290, 2016.
- [3] G. Akin, “Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları”, *Ank. Üniversitesi Dil Ve Tar.-Coğrafya Fakültesi Derg.*, c. 46, sy 2, Art. sy 2, Oca. 2006.
- [4] A. S. Reyhan ve H. Reyhan, “KÜRESEL ISINMANIN NEDENLERİ, SONUÇLARI, ÇÖZÜMLERİ ÜZERİNE YENİ DEĞERLENDİRMELER”, s. 24, 2016.
- [5] R. Weber, A. K. Gupta, ve S. Mochida, “High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects”, *Appl. Energy*, c. 278, s. 115551, Kas. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115551.
- [6] A. Cavaliere ve M. de Joannon, “Mild Combustion”, *Prog. Energy Combust. Sci.*, c. 30, sy 4, ss. 329-366, Oca. 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
- [7] R. Lückerrath, W. Meier, ve M. Aigner, “FLOX[®] Combustion at High Pressure With Different Fuel Compositions”, *J. Eng. Gas Turbines Power-Trans. Asme - J ENG GAS TURB POWER-T ASME*, c. 130, Oca. 2008, doi: 10.1115/1.2749280.
- [8] V. K. Arghode, A. K. Gupta, ve K. M. Bryden, “High intensity colorless distributed combustion for ultra low emissions and enhanced performance”, *Appl. Energy*, c. 92, ss. 822-830, Nis. 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.039.

- [9] Karyeyen, S., Feser, J.S. and Gupta, A.K. (2019). Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels. *Applied Energy*, 251(1), 113354-113362.
- [10] Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2013). Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion. *Applied Energy*, 104 (1), 71-79.
- [11] Yu, Y., Gaofeng, W., Qizhao, L., Chengbiao, M. and Xianjun, X. (2010). Flameless combustion for hydrogen containing fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 2694-2697
- [12] Derudi, M., Villani, A. and Rota, R. (2007). Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 3393-3400.
- [13] Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2016). Fuel property effects on distributed combustion. *Fuel*, 171(1), 116-124.
- [14] Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B.B., Mei, Z., Zhang, J. and Parente, A. (2014) Mechanisms of NO Formation in MILD Combustion of CH₄/H₂ Fuel Blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 19187–19203
- [15] İlbaş, M. ve Karyeyen, S. (2014). Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor, *International Journal of Energy Research*, 38(9), 1171-1180.
- [16] Hashemi, S. A., Skeikhzadeh, G. A., Hajialigol, N. ve Nikfar, M. (2012). Numerical investigation of NOX reduction in a sudden-expansion combustor with inclined turbulent air jet, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3723-3731
- [17] Yilmaz, I. ve Ilbas, M. (2008). An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 178-187.]
- [18] Gupta, S. K. ve Arghode, V. K. (2019). Investigation of a reverse-cross flow combustor with varying fuel injection momentum, *Thermal Science and Engineering Process*, 10, 232-244.
- [19] Ilbas, A, Ozdemir, M. B ve Karyeyen S. (2022). Investigation of colorless distributed combustion regime using a high internal recirculative combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12338-12353.



Mixed Integer Programming Formulation for Time-Dependent Petrol Station Replenishment Problem: A Real-Life Case in İstanbul

Ertugrul AYYILDIZ^{1,*} Alev TASKIN²

¹Karadeniz Technical University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, 61080, Ortahisar/TRABZON

²Yildiz Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Industrial Engineering Department, 34349, Besiktas/ISTANBUL

Article Info

Research article

Received: 19.07.2022

Revision: 08.10.2022

Accepted: 05.11.2022

Keywords

Marine Pollution

Petrol Station

Replenishment Problem

Risk Minimization

Time-dependent VRP

Abstract

Limited resources must be used effectively, precisely, and damage-free considering the increase in the consumption of petroleum and petroleum-derived products. Therefore, the accurate and effective distribution of petroleum and related problems with petroleum distribution have attracted much attention among practitioners and optimization working researchers over the years. The petroleum distribution problem, as a version of the vehicle routing problem (VRP), deals with the planning of petroleum distribution from the depot(s) to the petrol stations safely and quickly. In this study, the petrol station replenishment problem (PSRP) is handled and a case study is presented for a public company located in İstanbul. The problem is considered as a time-dependent VRP with time windows. To handle the proposed time-dependent problem in a more realistic way, variable tanker speeds are considered based on traffic density. In this study, a novel mixed integer mathematical model to solve time dependent PSRP with time windows is proposed. The optimum route is determined in which risks such as environment and marine pollution may occur in case of possible accidents, and these risks are minimized by the proposed mathematical model considering factors such as traffic, vehicle speed, road structure, the road's proximity to the sea, and living areas.

1. INTRODUCTION

Distribution operations are a part of the goods and service industries. The corporation uses distribution operations as one of its marketing strategies to get its goods in front of buyers. Distribution channels are a group of individuals or organizations that carry out all the tasks required to convey goods or services from a business to the final consumers [1]. In today's world, petroleum and petroleum products are indispensable resources in meeting energy needs [2]. These resources are used in almost every area such as manufacturing, transportation, energy, and service. The demand for petroleum is increasing day by day with the rapid development of technology in recent years as a consequence [3]. The adverse effects of petroleum and petroleum products on both human life and the environment in which the usage increases in all areas of life are not also negligible. Petroleum and petroleum products create more pollutants and greenhouse gases than renewable energy sources since it is an exhaustible and non-renewable fossil fuel [4]. Greenhouse gases affect the environment and they may cause climate change [5]. In addition, some important problems with marine environmental pollution are caused by leaks during petroleum product distribution, especially at the time of accidents. Therefore, petroleum and petroleum products should be distributed with minimum risk and in the most convenient way to protect the environment and human health. With the increase in the consumption of petroleum and petroleum products, limited resources around the world must be provided efficiently, accurately, and with minimal damage. In the current literature, such problems are addressed under the title of hazardous material transportation problem (HMTTP).

The HMTP is a current research topic that has been focused on by many different scholars and practitioners for a long time. Mathematical modeling techniques, such as mixed integer programming, stochastic programming, and robust modeling, are the most frequently applied methods to solve many different variations of HMTPs. However, many scholars use multi-criteria decision-making (MCDM) approaches to deal with HMTPs and challenges associated with them. For different objectives, including risk assessment, location selection, and strategy selection, many MCDM methodologies are used. The prominent of these studies can be summarized as given below.

Erkut & Ingolfsson (2000) propose catastrophe-avoidance models for three different scenarios considering accidents during the hazardous material distribution. The first model minimizes the number of exposed population, the second model integrates route into the final solution, and explicit disutility function is used in the third model [6]. Kara & Verter (2004) develop a bilevel optimization model to solve network design problems with respect to the risk of hazardous material transportation consists of environmental and social risks associated with the carrier route [7]. Erkut & Gzara (2008) focus on the hazardous materials network design problem considering government rules. The problem is modeled as a variation of the bilevel network flow optimization problem and solved using heuristic optimization techniques [8]. Zografos & Androusoyopoulos (2008) develop a decision support model to determine the best route(s) for hazardous materials transportation with minimizing the risks and costs. They determine the evacuation route for victims and emergency unit locations to minimize the damage caused by accidents [9]. Leonelli et al. (2000) formulate the HMTP as a variation of a minimum-cost flow network problem. The cost of each arc is determined considering the social risk, individual risk, and the cost [10]. Samanlıoğlu (2013) develops a multiobjective location-routing model to determine the most suitable locations of treatment centers and disposal centers. The proposed model determines the transportation of best route for the hazardous materials while minimizing the risks related to population exposure along with transportation and, around disposal centers and treatment centers [11]. Saat et al. (2014) present a comprehensive analyzes for hazardous material transportation by rail. The risks per car-mile per ton-mile are calculated annually using historical accident data to compare the risks among different hazardous materials [12]. Bonvicini et al. (2015) specify the environmental risk indexes to use in the risk analysis for the risk assessment of onshore pipelines [13]. Lam & Zhou (2016) present static analyzes that focus on accident data from onshore pipelines and provide onshore pipeline risk assessment methodology [14]. Zarei et al. (2017) propose a comprehensive dynamic risk analysis based on different accident scenarios for a natural gas station using Failure mode and effect analysis (FMEA), Bayesian networks, and bow tie diagram [15]. Ma (2018) uses constraint programming techniques to design a hazardous material transportation network in an uncertain environment, and solve the model with a multi-objective genetic algorithm [16]. Yang et al. (2018) group risks under the titles of environment, human, material, and management and aims to minimize these risks for the HMTP by fuzzy quality function deployment (QFD) [17]. Hu et al. (2018) focus on three-level HMTP among suppliers, manufacturers, and retailers and balance the cost with risk under fuzzy environment [18]. Hu et al. (2019) determine safe routes for HMTP by considering the traffic restrictions [19]. Ghaderi & Burdett (2019) determine the best strategy for the transportation of hazardous materials through a bimodal transportation network [20]. Li et al. (2019) present a systematic framework for the management of hazardous materials risk. They firstly define risk factors and determine the weight of factors by the fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP), then, they analyze these risks by fuzzy FMEA, and risks are combined with QFD. They also develop a non-linear goal programming to determine the levels of risk measures [21]. Chiou (2020) develops a resilience-based signal control system to manage maximum risk over arcs in the network for HMTP and the maximum risk over the network is reduced by stochastic programming [22]. Hu et al. (2020) determine the plan for production and routes for transportation routes within a fixed period for multi-period HMTP [23]. Ziaei and Jabbarzadeh (2021) propose a robust location and route for hazardous materials by incorporating carbon emission and hazardous materials transportation risks [24]. Zhou et al. (2021) focus on HMTP and develop a multi-depot heterogeneous VRP model to minimize both risks and costs [25]. Ayyildiz and Taskin Gumus (2021) specify the risk factors for hazardous material transportation and determine the weights of these factors using Pythagorean fuzzy AHP [26]. Jinkun et al. (2022) develop a multi-objective pareto-based network design model to mitigate hazardous material transportation risks [27]. Additionally, some remarkable studies on this subject are summarized in Table 1 according to the objective functions and method used. Table 1 summarizes the different extensions of HMTP. As can be seen from

the table, different problem structures, objective functions are used to deal with HMTP extensions. Also different mathematical models proposed to solve different objectives.

Table 1. The remarkable studies based on HMTP

| <i>Source</i> | <i>Problem</i> | <i>Method</i> | <i>Objective Function</i> |
|---------------|---|---------------------------|--|
| [28] | Traditional HMTP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [29] | Multi-objective stochastic dynamic HMTP | Heuristic algorithm | Optimum route |
| [30] | Multi-objective HMTP | Multi-objective modeling | Minimum risk, cost, exposed population |
| [31] | Split delivery HMTP | Bi-level modeling | Minimum cost |
| [32] | Multi product HMTP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [33] | HMTP focused on vehicle | Multi-objective modeling | Minimum risk of vehicle |
| [34] | Hazardous waste routing problem | Goal programming | Minimum cost |

The HMTP and its extensions are a popular research area among academics and researchers. These extensions deal with certainty (deterministic) and uncertainty (i.e., stochastic, fuzzy, or robust) in accordance with the problem structures. These problems can include a variety of real-life constraints related to risk, cost, distance and vehicle factors, security conditions, environmental, marine and energy issues, traffic density, and more [35]. There are different objective functions for HMTPs, as can be seen in Table 1. Minimizing total traveling time is the aim that we determine in this study, as the time spent on the road decreases, the risk of environmental and marine pollution decreases. In the following, the petrol station replenishment problems (PSRP) in the literature are discussed and summarized in Table 2.

Table 2. The remarkable studies based on PSRP

| <i>Source</i> | <i>Problem</i> | <i>Method</i> | <i>Objective Function</i> |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| [36] | Multi stage PSRP | Mixed integer programming | Maximum profit |
| [37] | Multi stage PSRP | Heuristic algorithm | Maximum service level |
| [38] | Traditional PSRP | Multi-objective modeling | Minimum service level |
| [39] | Multi product and stage PSRP | Mixed integer programming | Maximum profit |
| [40] | Multi product and depot PSRP | Mixed integer programming | Minimum cost |
| [41] | Trip packing PSRP | Mixed integer programming | Maximum profit |
| [42] | Multi product, stage and depot PSRP | Heuristic algorithm | Maximum profit |
| [43] | Periodic PSRP | Bi-level modeling | Minimax service level |
| [44] | Multi stage PSRP | Heuristic algorithm | Minimum distance |
| [45] | Multi product and stage PSRP | Mixed integer programming | Minimum cost |
| [46] | Multi product, stage and depot PSRP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [47] | Multi product and stage PSRP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [48] | Periodic PSRP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [49] | Heterogeneous fleet PSRP | Mixed integer programming | Minimum distance |
| [50] | PSRP with forecasted demand | Bi-level modeling | Minimum loss and distance |
| [51] | Multi product PSRP | Mixed integer programming | Minimum cost |

There are different extensions and approaches for PSRP in the literature, as can be seen in Table 2. Based on the research in the literature, the problem addressed in this study is considered a novel PSRP problem because it first takes into account traffic density. In addition to other studies, this article deals with time

dependency and time window with a realistic objective function and also includes a real-life application for Istanbul.

This study aims to prepare a decision support system for the transportation of petroleum supplied from a refinery to petrol stations in different regions, with minimum risk in terms of environmental and marine pollution. Furthermore, the proposed mathematical model aims to decrease the total travel distance of tanker in order to reduce carbon emission because of the future emission space would be extremely strict [52]. The current study fills the following literature gaps:

- ✓ This study deals with time dependency and time window with a realistic objective function.
- ✓ This study considers environmental risks in the event of an accident.
- ✓ Environmental risk factors are determined by the HMTP literature and then the most appropriate factors for the PSRP are determined by consulting experts.
- ✓ The Delphi technique is used to determine the risks.
- ✓ This study is the first time-dependent vehicle routing problem application to petroleum transportation.
- ✓ This study also has a real-life application in Istanbul.

Within the scope of the study, the PSRP of a public company that distributes petroleum to petrol stations is discussed. Minimum marine and environmental pollution is the purposes of this problem. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 gives the proposed mathematical model. Detailed problem definition and data collection are given in Section 3. Section 4 includes the application of the real case for petroleum transportation and the sensitivity analysis of the proposed methodology. Finally, Section 5 presents the conclusions and future projections for this study.

2.THE PROPOSED MATHEMATICAL MODEL

The steps of methodology to solve the considered time dependent PSRP with time windows are introduced in this section. The basic steps of the proposed methodology are data collection, mathematical modeling, and sensitivity analysis phases. The data to be collected to solve the model include traffic data, distances, service times, and time windows.

Traffic data is collected from traffic density map prepared by the Istanbul Metropolitan Municipality, distances between petrol stations are obtained by Google Maps, and service time for petrol stations is determined by experts. Time windows are determined according to the company's distribution strategy. Then, the proposed mathematical model to designate the time dependent PSRP with time windows is structured and solved using the collected data. The mathematical model is solved by IBM ILOG Cplex OPL Optimization Studio 12.8. Finally, the results are presented as routes and travel times and measured via sensitivity analysis. Details of these steps are presented in the following sections.

In the PSRP, it is aimed to minimize the total risk taking into consideration environmental concerns. Less travel time means less risk for the tankers in the distribution network. This fact highlights the practical potential of real-life practice. Accordingly, related information for a realistic approach to the PSRP is described below.

- The PSRP of a public company serving in Istanbul has been addressed.
- Petroleum is distributed to petrol stations through a tanker from a refinery.
- The refinery and most of the petrol stations are located by the sea.
- The stations do not have the infrastructure to supply petroleum by ships and some stations can only be reached by highway. So, petroleum must be distributed by land.
- It is assumed that the demands of the stations should be met at once.
- Petroleum distribution should be done within the time window that each station is suitable for service.
- Tanker speed varies according to traffic density.

During the determination of the risk of the route to be used by the tanker, many factors such as transportation time, distance to sea, and structure of the road (i.e. number of lanes, slope, type of road, etc.) are taken into account.

It is assumed that there is no contamination in the sea because the tanker that returns to the refinery will not carry petroleum.

Based on the information given above, a mathematical model is prepared for the problem. In this mathematical model, it is defined on a directed graph that is expressed as $G = (N, A)$, where N represents the set of nodes and A represents the set of arcs between nodes. The locations of each petrol station and refinery are represented as a node. The index "1" represents the refinery node. The set of arcs is defined on $A = \{(i, j): \forall i, j \in N, i \neq j\}$ and d_{ij} means distance between node i and node j , and it is nonnegative; also $d_{ij} = d_{ji}$. Each petrol station has a service time S_i and time window m_i, n_i . Arrival time to the petrol station A_i must be $m_i \leq A_i \leq n_i$. If the arrival time of the vehicle is earlier than m_i , it must wait (W_i) until the start of service is possible. The time intervals defined on T have starting time B_t and ending time E_t . The speed V_t varies on this time interval. Traveling time (t_{ij}) of the tanker between nodes i and j is calculated taking into account the speed V_t and distance d_{ij} . If the travel begins in the time interval "t" and ends in the next time interval "u", then the traveling distance is calculated via $(E_t - D_i)V_t + (A_j - B_u)V_u$ using leaving and arrival times. It is assumed that the tanker leaving the refinery must return to the depot by completing the operations within working hours. It is also assumed that the tanker must deliver petroleum to the petrol stations between 06:00 a.m.-18:00 (starting at 06:00 a.m. and ending at 18:00) and these delivery periods vary according to the time windows of the stations. The traffic density is examined for each 60-minute period (for example between 06:00-07:00, 7:00-8:00, etc.) and these data are used in the model. The tanker originates at the refinery, services the petrol stations, and returns to the refinery. The objective of the problem is to service all petrol stations while minimizing the total risk.

Sets

T Set of time intervals

I Set of nodes

Parameters

d_{ij} The distance between nodes (i, j)

R_{ij} The risk between nodes (i, j)

V_t The speed of tanker (t)

B_t Beginning time of time interval (t)

E_t Ending time of time interval (t)

S_i Service time for the node (i)

$[m_i, n_i]$ Time window for the node (i)

D_i Demand of the node (i)

C Capacity of tanker

M Big number

Decision Variables

A_i Arrival time to node (i)

L_i Leaving time from node (i)

t_{ij} Traveling time of tanker between nodes (i, j)

W_i Waiting time at node (i)

$X_{ij} \begin{cases} 1, & \text{if arc (i, j) is used by tanker;} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

$Y_{ij}^{tu} \begin{cases} 1, & \text{if tanker leaves from node (i) at time interval (t), arrives to node (j) at time interval (u)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

Formulation

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in I/1} t_{ij} R_{ij} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{t \in T} \sum_{u \in T} Y_{ij}^{tu} = X_{ij} \quad (\forall i, j \in I) \quad (2)$$

$$t_{ij} \leq M X_{ij} \quad (\forall i, j \in I) \quad (3)$$

$$t_{ij} \leq A_j - L_i + M(1 - X_{ij}) \quad (\forall i, j \in I) \quad (4)$$

$$t_{ij} \geq A_j - L_i + M(X_{ij} - 1) \quad (\forall i, j \in I) \quad (5)$$

$$d_{ij} - M(2 - X_{ij} - Y_{ij}^{tt}) \leq (A_j - L_i)V_t \quad (\forall i, j \in I), (\forall t \in T) \quad (6)$$

$$d_{ij} - M(X_{ij} + Y_{ij}^{tt} - 2) \geq (A_j - L_i)V_t \quad (\forall i, j \in I), (\forall t \in T) \quad (7)$$

$$d_{ij} - M(2 - X_{ij} - Y_{ij}^{tu}) \leq (E_t - L_i)V_t + \sum_{t < \rho < u} (E_\rho - B_\rho)V_\rho + (A_j - B_u)V_u \quad (\forall i, j \in I), (\forall t, u \in T), u > t \quad (8)$$

$$d_{ij} - M(X_{ij} + Y_{ij}^{tu} - 2) \geq (E_t - L_i)V_t + \sum_{t < \rho < u} (E_\rho - B_\rho)V_\rho + (A_j - B_u)V_u \quad (\forall i, j \in I), (\forall t, u \in T), u > t \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{t, u \in T} Y_{ij}^{tu} E_t \geq L_i \quad (\forall i \in I) \quad (10)$$

$$\sum_{j \in I} \sum_{t, u \in T} Y_{ij}^{tu} B_t \leq L_i \quad (\forall i \in I) \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t, u \in T} Y_{ij}^{tu} E_u \geq A_j \quad (\forall j \in I) \quad (12)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t, u \in T} Y_{ij}^{tu} B_u \leq A_j \quad (\forall j \in I) \quad (13)$$

$$L_i = A_i + S_i + W_i \quad (\forall i \in I) \quad (14)$$

$$\sum_{j \in I} X_{ij} = 1 \quad (\forall i \in I) \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = 1 \quad (\forall j \in I) \quad (16)$$

$$A_i + W_i \geq m_i \quad (\forall i \in I) \quad (17)$$

$$L_i \leq n_i \quad (\forall i \in I) \quad (18)$$

$$\sum_{i, j \in I} R_{ij} X_{ij} \leq R_{max} \quad (19)$$

$$\sum_{i, j \in I} D_i X_{ij} \leq C \quad (20)$$

$$L_1 \leq L_i \quad (\forall i \in I) \quad (21)$$

$$A_1 \geq A_i \quad (\forall i \in I) \quad (22)$$

$$A_i, L_i, t_{ij}, W_i \geq 0 \quad (\forall i, j \in I), (\forall t \in T) \quad (23)$$

$$X_{ij}, Y_{ij}^{tu} \in \{0, 1\} \quad (\forall i, j \in I), (\forall t, u \in T) \quad (24)$$

The objective function (1) minimizes the total risk. Constraint (2) is for each arc; if the arc is used, it ensures that the vehicle starts on a journey and ends in the same or a different time period. The traveling time can take values based on the usage of arc according to the constraint (3). The constraints (4) and (5) ensure that the arrival time of tanker to nodes and leaving times of tanker from nodes are related to the traveling times between nodes, and they also prevent the formation of subtours by following the arrival times of nodes, respectively. Constraints (6), (7), (8) and (9) allow the transitions between time intervals to the speed of the be linked to tanker and distance traveled. Constraints (6) and (7) are valid when the entire journey takes place in the same time interval. Constraints (8) and (9) are applied when the journey begins at the time interval "t" and ends at the next time interval "u". Constraints (10) and (11) ensure that the lower and upper limits of the time interval are linked to the time of leaving the tanker from each node. Constraints (12) and (13) also ensure that the lower and upper limits of time intervals are linked to the arrival time of the tanker to each node. Constraint (14) ensures that the leaving time of the tanker is equal to the sum of arriving time to the node, the waiting time at the node and the service time spent at the node. Constraints (15) and (16)

are balance constraints for nodes. Constraints (17) and (18) consider that every petrol station must be supplied within a certain time window. If the tanker arrives too early, it must wait until the start of service is possible. Total risk cannot exceed maximum risk according to constraint (19). Constraint (20) ensures that the total demand of serviced stations can not exceed the capacity of the tanker. Leaving time from refinery must be less than leaving times of all nodes. So, the vehicle leaves the refinery first, according to constraint (21). The arrival time to the refinery must be greater than the arrival times of all nodes. So, the vehicle arrives at the refinery last, according to constraint (22). Node 1 denotes the refinery. Constraints (23) and (24) are non-negativity constraints and binary constraints for the decision variables.

3.REAL LIFE APPLICATION FOR ISTANBUL

Within the scope of the study, the PSRP is handled for Istanbul. Istanbul is the city where most of the energy consumption is seen in Turkey due to the high population [53]. Environmental and marine pollution is also increasing in the city. The problem of a public company that distributes petroleum to petrol stations in the target region is addressed here. Figure 1 shows the locations of the refineries and petrol stations in the supply network of this company. The company distributes petroleum between these points.

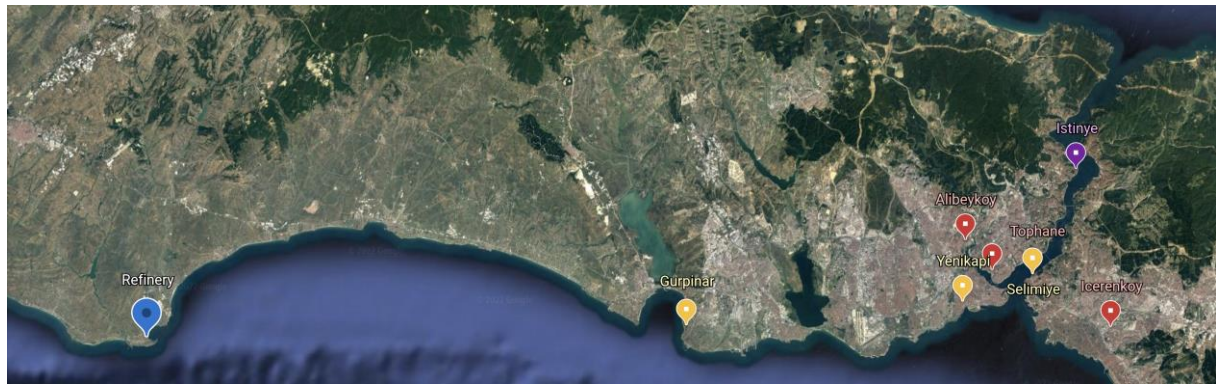


Figure 1. Locations of the petrol stations and the refinery [26]

The company supplies petroleum products from the refinery (shown with a blue pin in Figure 1) and distributes them to seven stations in Istanbul. There are three types of stations in the company's distribution network. The company's own petrol stations are represented with yellow pins, the petrol stations rented by the company to operate for other companies are represented with red pins, and lastly, the purple pin shows the station that provides petroleum to sea vehicles passing through the Bosphorus. The company's petroleum tanker is assumed to be distributed to the stations every day between 06:00 a.m.-18:00 and returns to the refinery after completing the distribution. It is assumed that the tanker can deliver to the stations indicated in yellow pins at any time during the day, to the stations indicated in red pins only between 06:00 a.m. and 12:00, and to the station indicated with purple pin only between 12:00 and 18:00. In addition, it is assumed that the service times of the tanker are different for stations. Table 3 shows the distances between the points indicated with pins in the company's petroleum distribution network.

Table 3. Distances between petrol stations and refinery (km.)

| | Refinery | Gürpınar | Yenikapı | Selimiye | İçerenköy | Tophane | Alibeyköy | İstinye |
|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|
| Refinery | - | 66.8 | 105 | 123 | 130 | 106 | 109 | 113 |
| Gürpınar | 66.8 | - | 40.3 | 57.8 | 55.4 | 41.5 | 47.6 | 52.1 |
| Yenikapı | 105 | 40.3 | - | 18.5 | 23.9 | 6 | 11.8 | 24.8 |
| Selimiye | 123 | 57.8 | 18.5 | - | 13.9 | 17.8 | 18.3 | 19.1 |
| İçerenköy | 130 | 55.4 | 23.9 | 13.9 | - | 18.5 | 30.4 | 23.2 |
| Tophane | 106 | 41.5 | 6 | 17.8 | 18.5 | - | 8 | 21.7 |
| Alibeyköy | 109 | 47.6 | 11.8 | 18.3 | 30.4 | 8 | - | 14.4 |
| İstinye | 113 | 52.1 | 24.8 | 19.1 | 23.2 | 21.7 | 14.4 | - |

The risk factors are determined by a comprehensive literature review, and then the most appropriate factors are specified by consulting with anonymous experts that study transportation operations for the petroleum transportation problem handled in this study. As a result, critical risk factors for petroleum transportation are determined in five main titles as road, environment, traffic, vehicle and material [26].

Road factors are important in determining the risks of HMTPs [54]. Traffic, road conditions can cause accidents that can have dangerous consequences [55]. The capacity can be determined according to the number of lanes on the road. The road material (gravel, asphalt, etc.) is also taken into consideration to determine the risks. In addition, deteriorated roads can cause an accident. Therefore, the road condition plays an important role in the transportation of hazardous materials.

The risk values of the factors are very crucial and should be considered for a possible accident for the tanker, which carries petroleum from the refinery to the petrol stations. It is obvious that petroleum leaking from the tanker in case of an accident can cause marine and environmental pollution. In this study, the risks of the roads the tanker uses on the distribution network are determined by expert interviews. Experts determine road risk values of the roads between 1 and 10 considering the proximity of the road to the sea and living areas, traffic density, the structure of the road, etc.

In this study, the Delphi technique is adopted while determining risks, and interviews with five different experts are carried out face-to-face and via email during the assessment of risks within the scope of this approach. Three of these experts work in petroleum transportation operations for public company. In addition, the opinions of two different academicians taking part in academic studies and projects on similar subjects are also taken, and the first meeting is held with the experts and ideas are collected in order to better understand the current situation and the problem. These negotiations are repeated until consensus is reached and expert opinions are obtained again and again. At the end of the process, the experts share a comprehensive common opinion about the risks. As a result of the evaluations by the experts on the risks, it is concluded that the experts had the same opinions on the risk values. Thus, the identified risks are integrated into the study. The risk values between nodes are given in Table 4

Table 4. The risk values of arcs

| | Refinery | Gürpınar | Yenikapı | Selimiye | İçerenköy | Tophane | Alibeyköy | İstinye |
|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|---------|-----------|---------|
| Refinery | - | 2 | 4 | 8 | 9 | 5 | 5 | 10 |
| Gürpınar | 0 | - | 1 | 5 | 4 | 1 | 1 | 5 |
| Yenikapı | 0 | 1 | - | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 |
| Selimiye | 0 | 5 | 2 | - | 1 | 2 | 2 | 4 |
| İçerenköy | 0 | 4 | 1 | 1 | - | 3 | 3 | 5 |
| Tophane | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | - | 1 | 2 |
| Alibeyköy | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 1 | - | 2 |
| İstinye | 0 | 5 | 2 | 4 | 5 | 2 | 2 | - |

The time-dependent VRP consists of the optimum routing of vehicles. In the time-dependent VRP, the traveling times between nodes may vary depending on the hours of the day [56]. When determining the travel time between nodes in the problem, the time period in which the travel begins on that arc is important. The planning period is divided into time intervals and different speeds are defined in these intervals. Usually, the solution aims to minimize the total travel time. The arrival time of the vehicle leaving from one node to the next node is determined by the departure time from the first node and the time spent on the route it uses. In this type of problem, the travel time is calculated using the departure time from each node and the average speed varying depending on that time. This is important in terms of structuring a realistic approach in traffic-intensive city centers. For example; while the speeds of the vehicles decrease due to very busy traffic during the morning hours, their speeds increase when the traffic density decreases at noon. In this study, the tanker speeds are determined taking into account the traffic density.

Risk is related to the time spent on the road, the density of traffic, and the speed of the vehicle. The proposed model for PSRP, which takes into account changing vehicle speeds ensures a more realistic approach than the traditional approaches. The travel time of the tanker depends on the moment it leaves the petrol

station/refinery. Therefore, the planning period of petroleum distribution is divided into time intervals; then the different speeds are determined in these time intervals according to traffic density. By this way, a novel mixed integer programming formulation is developed to solve this time dependent VRP problem which minimizing the risk.

The traffic density in Istanbul, the largest and crowded city in Turkey, is one of the biggest problems. At the end of the year 2018, traffic density starts on business days in the morning and lasts approximately 2 hours, from 07:00 a.m. to 09:00 a.m., and then decreases in the middle of the day [57]. The petroleum distribution process must be completed between 06:00 a.m. and 18:00 in the problem handled in the study.

The speed of the tanker is reduced due to traffic density and so petrol distribution to the stations takes a longer time. The traffic density graph between 06:00 a.m.-18:00 in Istanbul can be seen in Figure 2.

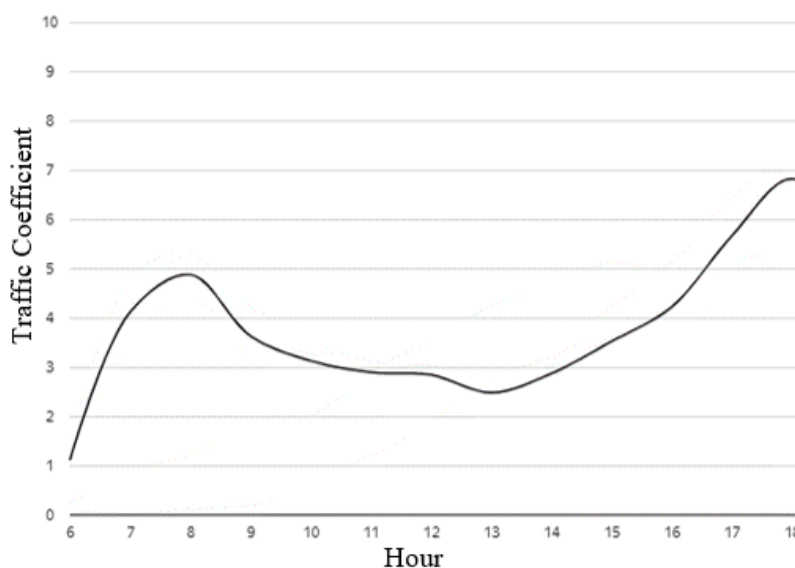


Figure 2. Traffic density graphic between 06:00 a.m.-18:00 p.m.

As can be seen in Figure 2, the traffic density varies between 06:00 a.m. and 18:00. To better express this variability in the proposed model, 60 minutes of time intervals are taken into consideration. Vehicle speeds varying according to traffic density levels in these time periods are determined using Equation 3.1 and are given in Table 5. Equation 25 is formed using historical data given in the 3-Year Traffic Analysis for Istanbul by Yandex [57]. The average traffic coefficients in an hour are determined using Figure 2.

$$\text{Speed}(\text{km/h}) = 100 - 10(\text{Average Traffic Coefficient in Hour}) \quad (25)$$

Table 5. Tanker speeds according to the time interval

| Time Interval | Density | Speed (km/h) |
|---------------|---------|--------------|
| 06:00-07:00 | 2.50 | 70 |
| 07:00-08:00 | 4.25 | 57.5 |
| 08:00-09:00 | 4.30 | 57 |
| 09:00-10:00 | 3.30 | 67 |
| 10:00-11:00 | 2.95 | 70 |
| 11:00-12:00 | 2.75 | 70 |
| 12:00-13:00 | 2.50 | 70 |
| 13:00-14:00 | 2.75 | 70 |
| 14:00-15:00 | 3.10 | 69 |
| 15:00-16:00 | 3.50 | 65 |
| 16:00-17:00 | 5.00 | 50 |
| 17:00-18:00 | 6.50 | 35 |

The maximum speed limit in urban use in Istanbul is 70 km/h [58]. So, the speeds in time intervals of 06:00 a.m.-07:00 a.m. and 10:00 a.m.-14:00 are fixed at 70 km/h.

4.APPLICATION OF THE PROPOSED MODEL

The route of distribution of petroleum with minimum risk is obtained using the proposed mathematical model as shown in Figure 3. The objective function value that shows the risk degree is determined as 261.381. The proposed mathematical model is solved on a computer with Intel(R) Core(TM) i7-9750-H CPU @ 2.60 Ghz processor, 16.00 GB RAM, using IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8 package program. The central processing unit (CPU) time for this problem is 6.06 seconds.

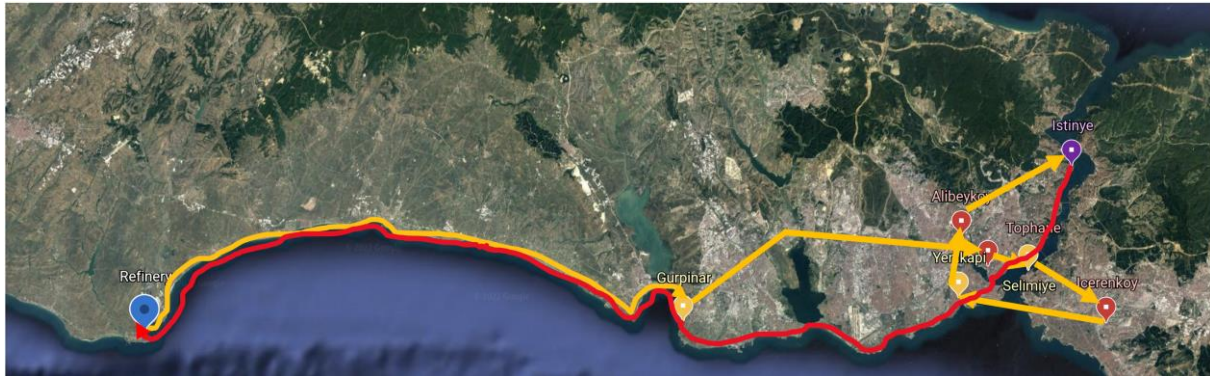


Figure 3. Optimum route for petroleum distribution

The route in which the tanker delivers petroleum by supplying from the refinery is shown in yellow. The route by which the tanker returned to the refinery after the last arrival of the İstinye Petrol Station is shown in red. For the problem handled in the study, it is assumed that the tanker would be empty after the petrol station in İstinye, which is the last served node. Therefore, it is assumed that there is no risk on the route shown in red. Therefore, even if the route determined by the proposed mathematical model for the return to the refinery is located close to the sea, it does not pose any risk. The arrival time, service time and waiting time for each petrol station are given in Table 6.

Table 6. Arrival time, service time and waiting time for each petrol station

| Petrol Station | Arrival | Service (min) | Waiting (min) | Departure | Traveling (min) |
|----------------|---------|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| Refinery | - | - | 0 | 06:00 | 57 |
| Gürpınar | 06:57 | 30 | 0 | 07:27 | 44 |
| Tophane | 08:11 | 33 | 3 | 08:47 | 18 |
| Selimiye | 09:05 | 32 | 0 | 09:37 | 12 |
| İçerenköy | 09:49 | 31 | 0 | 10:20 | 21 |
| Yenikapı | 10:41 | 40 | 0 | 11:21 | 10 |
| Alibeyköy | 11:31 | 29 | 0 | 12:00 | 12 |
| İstinye | 12:12 | 20 | 148 | 15:00 | 118 |
| Refinery | 16:58 | | | | |

The tanker distributes petroleum during the time period between 06:00 a.m.-16:58 by taking into account the traffic density. As can be seen from Table 6, to minimize travel time, the vehicle completes the entire distribution process at time intervals where the traffic density is less than in the other intervals. The tanker leaving the refinery at 06:00 a.m. follows the route Gürpınar-Tophane. It arrives in Tophane at 08:11 a.m. and completes the petroleum loading process at 08:44 a.m. considering 33 minutes of service time. Due to the high traffic density, the tanker waits for 3 minutes at Tophane, until 08:47 a.m. The vehicle leaves Tophane at 08:47 a.m. and follows the route Selimiye-çerenköy-Yenikap-Alibeyköy-İstinye, respectively, without waiting. It arrives at İstinye at 12:12 and completes the petroleum loading process at 12:32, considering 20 minutes of service time. Due to the high traffic density, the tanker waits for 148 minutes in

İstinye. Lastly, the tanker departs from İstinye at 15:00 and arrives refinery at 16:58. And so on tanker spends 292 minutes as total traveling time on the road.

4.1. Sensitivity Analysis

The proposed model for PSRP that takes into account changing vehicle speeds ensures a more realistic approach than the mathematical models with traditional PSRP. By solving the mathematical model, accurate and efficient results are obtained. Sensitivity analysis is also performed to show and prove the accuracy and efficiency of the proposed mathematical model by presenting a comparison with the traditional PSRP solution.

The traditional PSRP where variable vehicle speed based on traffic density is not considered is applied to the network. The tanker distributes petroleum to the stations at an average speed. This average speed is assumed to be 60 km/h. according to Table 5. The optimum distribution route obtained by the mathematical model for the traditional PSRP is determined as shown in Figure 4.

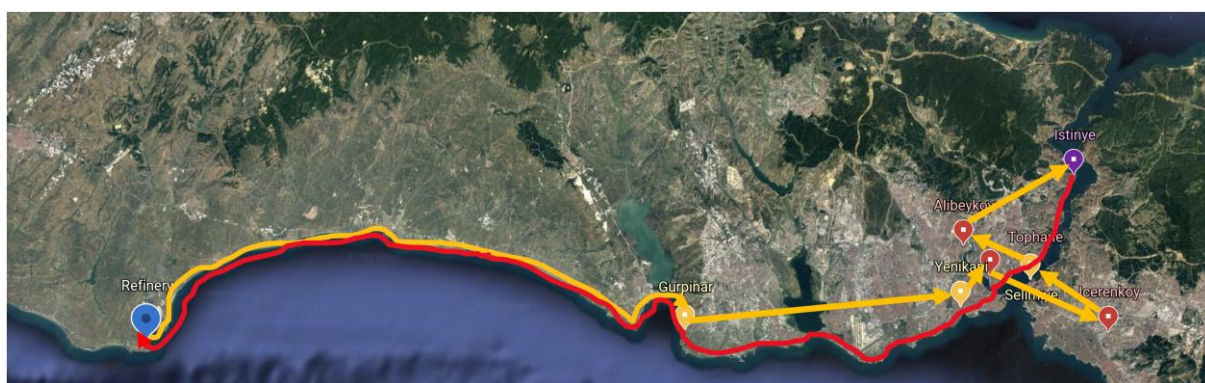


Figure 4. Optimum route for petroleum distribution according to the results of sensitivity analysis

The arrival time, service time and waiting time for each petrol station according to the results of the sensitivity analysis are given in Table 7.

Table 7. The results of the sensitivity analysis

| Petrol Station | Arrival | Service (min) | Waiting (min) | Departure | Traveling (min) |
|----------------|---------|---------------|---------------|-----------|-----------------|
| Refinery | - | - | 0 | 06:00 | 57 |
| Gürpınar | 06:57 | 30 | 0 | 07:27 | 42 |
| Yenikapı | 08:09 | 40 | 0 | 08:49 | 6 |
| Tophane | 08:55 | 33 | 0 | 09:27 | 17 |
| Çerçenköy | 09:44 | 31 | 0 | 10:15 | 12 |
| Selimiye | 10:27 | 32 | 0 | 10:59 | 16 |
| Alibeyköy | 11:15 | 29 | 0 | 11:44 | 12 |
| İstinye | 11:56 | 20 | 4 | 12:20 | 97 |
| Refinery | 13:57 | | | | |

In traditional PSRP with time windows where variable vehicle speeds based on traffic density are not taken into account, the tanker spends a total of 259 minutes on the road. This route has a risk value of 281.321. The tanker spends 292 minutes on the road in the proposed mathematical model, and the route has the risk value of 261.381. Compared to the result of the proposed mathematical model, the total risk on the road by tanker increases approximately 7.63% in the traditional model. As can be seen, traditional PSRP model has less traveling time, but also it has a bigger risk. The proposed mathematical model reduces the risk while increasing travel time.

4.CONCLUSIONS

The well-known PSRP with time windows, which calls for the determination of optimal routes by operating a fleet of tank trucks to serve a set of petrol stations over a specific planning horizon, is one of the most significant difficulties in the petroleum business. This problem is extended in this study by taking variable tanker speed into account. So, time-dependent PSRP with time windows is handled and novel mixed integer programming formulation is developed to solve problem. In this study, the PSRP for a public company located in Istanbul is handled. The problem is considered as a time-dependent vehicle routing problem with time windows. A novel mathematical model is proposed for the problem. The optimum route is determined by minimizing risks such as environment and marine pollution. The risk is determined by considering factors such as traffic, vehicle speed, road structure, proximity to the sea, and living areas and is used in the proposed mathematical model.

The contributions of the study to the literature can be defined as follows: (1) The petrol station replenishment problem for a public company located in Istanbul is discussed; (2) In order to handle the proposed time-dependent problem in a more realistic way, variable tanker speeds are considered based on traffic density; (3) Transportation times of the tanker from the refinery to the stations are determined; (4) A study that considers the risks of marine and environmental pollution is presented to the literature; (5) A real case is applied to show the applicability and reliability of the methodology; (6) The proposed method would be used for the organizations' objectives of improving their petroleum distribution strategies.

As future directions, larger and/or combined regions can be selected as the application area for the PSRP. Heuristic or metaheuristic algorithms can be used to handle more complex problems. Besides, the problem can be modeled as a robust model or a stochastic model.

REFERENCES

- [1] Febriandini IF, Yuniaristanto, Sutopo W (2020) Multi-Compartment Vehicle Routing Problem to Find the Alternative Distribution Route of Petroleum Product Delivery. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering
- [2] Qiu XH, Wang Z, Xue Q (2015) Investment in deepwater oil and gas exploration projects: a multi-factor analysis with a real options model. *Pet Sci* 12:525–533. <https://doi.org/10.1007/s12182-015-0039-4>
- [3] Li H, Sun RJ, Dong KY, et al (2017) Selecting China's strategic petroleum reserve sites by multi-objective programming model. *Pet Sci* 14:622–635. <https://doi.org/10.1007/s12182-017-0175-0>
- [4] Mohtasham J (2015) Review Article-Renewable Energies. *Energy Procedia* 74:1289–1297. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.774>
- [5] Pan X, Teng F, Tian Y, Wang G (2015) Countries' emission allowances towards the low-carbon world: A consistent study. *Appl Energy* 155:218–228. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.011>
- [6] Erkut E, Ingolfsson A (2000) Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning. *Transp Sci* 34:165–179. <https://doi.org/10.1287/trsc.34.2.165.12303>
- [7] Kara BY, Verter V (2004) Designing a road network for hazardous materials transportation. *Transp Sci* 38:188–196. <https://doi.org/10.1287/trsc.1030.0065>
- [8] Erkut E, Gzara F (2008) Solving the hazmat transport network design problem. *Comput Oper Res* 35:2234–2247. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.10.022>
- [9] Zografos KG, Androustopoulos KN (2008) A decision support system for integrated hazardous materials routing and emergency response decisions. *Transp Res Part C Emerg Technol* 16:684–703. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2008.01.004>
- [10] Leonelli P, Bonvicini S, Spadoni G (2000) Hazardous materials transportation: A risk-analysis-based routing methodology. *J Hazard Mater* 71:283–300. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(99\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(99)00084-9)

- [11] Samanlioglu F (2013) A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *Eur J Oper Res* 226:332–340. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.11.019>
- [12] Saat MR, Werth CJ, Schaeffer D, et al (2014) Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation. *J Hazard Mater* 264:560–569. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.051>
- [13] Bonvicini S, Antonioni G, Morra P, Cozzani V (2015) Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. *Process Saf Environ Prot* 93:31–49. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.04.007>
- [14] Lam C, Zhou W (2016) Statistical analyses of incidents on onshore gas transmission pipelines based on PHMSA database. *Int J Press Vessel Pip* 145:29–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.06.003>
- [15] Zarei E, Azadeh A, Khakzad N, et al (2017) Dynamic safety assessment of natural gas stations using Bayesian network. *J Hazard Mater* 321:830–840. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.09.074>
- [16] Ma C (2018) Network optimisation design of Hazmat based on multi-objective genetic algorithm under the uncertain environment. *Int J Bio-Inspired Comput* 12:236–244. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2018.096482>
- [17] Yang Q, Chin KS, Li YL (2018) A quality function deployment-based framework for the risk management of hazardous material transportation process. *J Loss Prev Process Ind* 52:81–92. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2018.02.001>
- [18] Hu H, Li J, Li X (2018) A credibilistic goal programming model for inventory routing problem with hazardous materials. *Soft Comput* 22:5803–5816. <https://doi.org/10.1007/s00500-017-2663-y>
- [19] Hu H, Li X, Zhang Y, et al (2019) Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads. *Comput Ind Eng* 128:861–876. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.044>
- [20] Ghaderi A, Burdett RL (2019) An integrated location and routing approach for transporting hazardous materials in a bi-modal transportation network. *Transp Res Part E Logist Transp Rev* 127:49–65. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.04.011>
- [21] Li YL, Yang Q, Chin KS (2019) A decision support model for risk management of hazardous materials road transportation based on quality function deployment. *Transp Res Part D Transp Environ* 74:154–173. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.026>
- [22] Chiou SW (2020) A resilience-based signal control for a time-dependent road network with hazmat transportation. *Reliab Eng Syst Saf* 193:106570. <https://doi.org/10.1016/j.res.2019.106570>
- [23] Hu H, Li J, Li X, Shang C (2020) Modeling and Solving a Multi-Period Inventory Fulfilling and Routing Problem for Hazardous Materials. *J Syst Sci Complex* 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11424-019-8176-2>
- [24] Ziaei Z, Jabbarzadeh A (2021) A multi-objective robust optimization approach for green location-routing planning of multi-modal transportation systems under uncertainty. *J Clean Prod* 291:. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125293>
- [25] Zhou Z, Ha M, Hu H, Ma H (2021) Half open multi-depot heterogeneous vehicle routing problem for hazardous materials transportation. *Sustain* 13:1–17. <https://doi.org/10.3390/su13031262>
- [26] Ayyildiz E, Taskin Gumus A (2021) Pythagorean fuzzy AHP based risk assessment methodology for hazardous material transportation: an application in Istanbul. *Environ Sci Pollut Res* 28:35798–35810. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13223-y>

- [27] Men J, Chen G, Zhou L, Chen P (2022) A pareto-based multi-objective network design approach for mitigating the risk of hazardous materials transportation. *Process Saf Environ Prot* 161:860–875. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.048>
- [28] Erkut E, Ingolfsson A (2005) Transport risk models for hazardous materials: Revisited. *Oper Res Lett* 33:81–89. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2004.02.006>
- [29] Chang TS, Nozick LK, Turnquist MA (2005) Multiobjective path finding in stochastic dynamic networks, with application to routing hazardous materials shipments. *Transp Sci* 39:383–399. <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0094>
- [30] Zheng B (2010) Multi-Objective Vehicle Routing Problem in Hazardous Material Transportation. In: ICLEM 2010. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp 3136–3142
- [31] Tang J, Ma Y, Guan J, Yan C (2013) A Max-Min Ant System for the split delivery weighted vehicle routing problem. *Expert Syst Appl* 40:7468–7477. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.06.068>
- [32] Cantú JMV, Solano AB, Leyva EAL, Acosta ML (2017) Optimization of territories and transport routes for hazardous materials in a distribution network. *J Ind Eng Manag* 10:604–622. <https://doi.org/10.3926/jiem.2107>
- [33] Zhang M, Wang N, He Z, et al (2019) Bi-Objective Vehicle Routing for Hazardous Materials Transportation with Actual Load Dependent Risks and Considering the Risk of Each Vehicle. *IEEE Trans Eng Manag* 66:429–442. <https://doi.org/10.1109/TEM.2018.2832049>
- [34] Wichapa N, Khokhajaikiat P (2018) Solving a multi-objective location routing problem for infectious waste disposal using hybrid goal programming and hybrid genetic algorithm. *Int J Ind Eng Comput* 9:75–98. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.4.003>
- [35] Caceres-Cruz J, Arias P, Guimarans D, et al (2014) Rich vehicle routing problem: Survey. *ACM Comput Surv* 47:1–28. <https://doi.org/10.1145/2666003>
- [36] Cornillier F, Boctor FF, Laporte G, Renaud J (2008) An exact algorithm for the petrol station replenishment problem. *J Oper Res Soc* 59:607–615. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602374>
- [37] Cornillier F, Boctor FF, Laporte G, Renaud J (2008) A heuristic for the multi-period petrol station replenishment problem. *Eur J Oper Res* 191:295–305. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.08.016>
- [38] Ng WL, Leung SCH, Lam JKP, Pan SW (2008) Petrol delivery tanker assignment and routing: A case study in Hong Kong. *J Oper Res Soc* 59:1191–1200. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602464>
- [39] Cornillier F, Laporte G, Boctor FF, Renaud J (2009) The petrol station replenishment problem with time windows. *Comput Oper Res* 36:919–935. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.11.007>
- [40] Surjandari I, Rachman A, Dianawati F, Wibowo RP (2011) Oil fuel delivery optimization for multi product and multi depot: the case of petrol station replenishment problem (PSRP). In: International Conference on Graphic and Image Processing (ICGIP 2011). SPIE, p 82853Q
- [41] Boctor FF, Renaud J, Cornillier F (2011) Trip packing in petrol stations replenishment. *Omega* 39:86–98. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2010.03.003>
- [42] Cornillier F, Boctor F, Renaud J (2012) Heuristics for the multi-depot petrol station replenishment problem with time windows. *Eur J Oper Res* 220:361–369. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.02.007>
- [43] Triki C (2013) Solution methods for the periodic petrol station replenishment problem. *J Eng Res* 10:69–77. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol10iss2pp69-77>

- [44] Carotenuto P, Giordani S, Massari S, Vagaggini F (2015) Periodic capacitated vehicle routing for retail distribution of fuel oils. In: *Transportation Research Procedia*. Elsevier, pp 735–744
- [45] Benantar A, Ouafi R, Boukachour J (2016) A petrol station replenishment problem: new variant and formulation. *Logist Res* 9:1–18. <https://doi.org/10.1007/s12159-016-0133-z>
- [46] Carotenuto P, Giordani S, Massari S, Vagaggini F (2018) A multi-depot periodic vehicle routing model for petrol station replenishment. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer Verlag, pp 421–437
- [47] Carotenuto P, Giordani S, Celani D (2017) Planning Retail Distribution of Fuel Oils. In: *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., pp 484–491
- [48] Al-Hinai N, Triki C (2020) A two-level evolutionary algorithm for solving the petrol station replenishment problem with periodicity constraints and service choice. *Ann Oper Res* 286:325–350. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-3117-3>
- [49] Yahyaoui H, Kaabachi I, Krichen S, Dekdouk A (2018) Two metaheuristic approaches for solving the multi-compartment vehicle routing problem. *Oper Res* 1–24. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-0403-4>
- [50] Gromov VA, Kuznietzov KA, Pigden T (2019) Decision support system for light petroleum products supply chain. *Oper Res* 19:219–236. <https://doi.org/10.1007/s12351-016-0290-5>
- [51] Wei XT, Liao Q, Zhang HR, et al (2021) MILP formulations for highway petrol station replenishment in initiative distribution mode. *Pet Sci* 18:994–1010. <https://doi.org/10.1007/S12182-021-00551-4>
- [52] Pan X, Teng F, Wang G (2014) Sharing emission space at an equitable basis: Allocation scheme based on the equal cumulative emission per capita principle. *Appl Energy* 113:1810–1818. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.021>
- [53] Kocak İ, Boran K (2019) Türkiye’deki İllerin Elektrik Tüketim Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi İle Değerlendirilmesi. *Politek Derg* 22:351–365. <https://doi.org/10.2339/POLITEKNİK.444371>
- [54] Huang X, Wang X, Pei J, et al (2018) Risk assessment of the areas along the highway due to hazardous material transportation accidents. *Nat Hazards* 93:1181–1202. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3346-4>
- [55] Xing Y, Chen S, Zhu S, et al (2020) Exploring risk factors contributing to the severity of hazardous material transportation accidents in China. *Int J Environ Res Public Health* 17:. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041344>
- [56] Gendreau M, Ghiani G, Guerriero E (2015) Time-dependent routing problems: A review. *Comput Oper Res* 64:189–197. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.06.001>
- [57] Yandex (2018) Veriler ve Raporlar — Yandex İstanbul için 3 Yıllık Trafik Analizi. https://yandex.com.tr/company/press_center/infographics/istanbul_traffic. Accessed 16 Jul 2020
- [58] Republic of Turkey-General Directorate of Highways (2020) Hız Sınırları. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/HizSinirlari.aspx>. Accessed 27 Jul 2020

Automatic Classification of Household Electrical Appliances with Convolutional Neural Network

Ebra Nur ZUREL¹  Zeynep Mine ALÇİN²  Muzaffer ASLAN^{3,*} 

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 12100, Merkez/BİNGÖL

² Vedat Topçuoğlu Anatolian Vocational High School, Electrical and Electronics Department, 27010, Şahinbey/GAZİANTEP

³ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 12100, Merkez/BİNGÖL

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 22.05.2022
Revision: 8.10.2022
Accepted: 25.10.2022

Highlights

- Energy Efficiency.

Keywords

Detection of Household Appliances,
Short-Term Fourier Transform,
Deep Learning,
CNN

In this study, a CNN model is proposed for the fast and effective detection of household appliances used in residential by using the time series properties. (Figure A.)

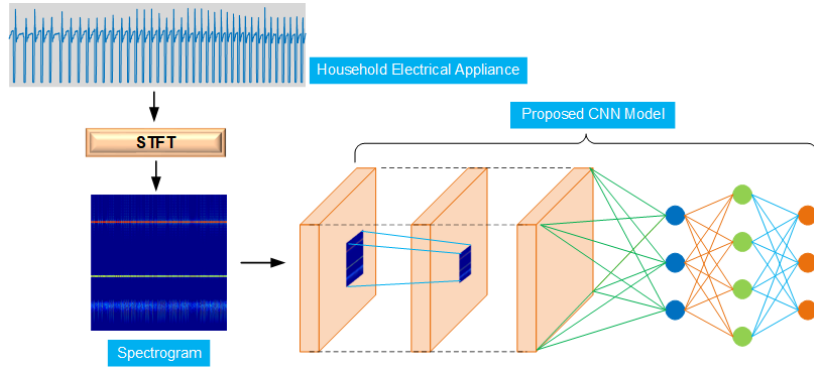


Figure A. The general structure of the proposed method

Purpose: Recently, smart building applications such as energy management and home automation system have been needed to meet the increasing electrical energy demand in residences. This study aims to plan efficient energy management by detecting these appliances from the power consumption of electrical appliances used in homes.

Theory and Methods: In the preprocessing stage of the proposed method, time series of 18 residential appliances were converted into images with STFT, which is more sensitive to frequency changes. These images were then resized in accordance with the designed CNN model input. Then, these images were applied to the CNN model with the feature designed, and the automatic detection of the devices used in the houses was realized.

Results: In the experimental studies carried out with the proposed method for detecting household appliances, the appliances in the dataset have an accuracy rate of 94.78%.

Conclusion: The proposed model achieved a higher performance rate of 1.98% in accuracy and 13.12% in the F1 score when the state-of-the-art methods of detecting electrical household appliances were compared.



Automatic Classification of Household Electrical Appliances with Convolutional Neural Network

Ebra Nur ZUREL¹ Zeynep Mine ALÇİN² Muzaffer ASLAN^{3,*}

¹ Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 12100, Merkez/BİNGÖL

² Vedat Topçuoğlu Anadolu Meslek Lisesi, Elektrik-Elektronik Bölümü, 27010, Şahinbey/GAZİANTEP

³ Bingöl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 12100, Merkez/BİNGÖL

Abstract

Today, technological developments increase the demand for energy resources at a great rate. In particular, the increase in the number of electrical appliances used in residences increases the consumption of electrical energy in homes, as in the industry. Effective supply-demand balance depends on identifying electrical loads in the home and the design of non-intrusive load monitoring (NILM) systems. Through NILM systems, users can control their household appliance usage habits and then adjust their behavior to save electricity. It is a topic of recent interest in both academia and industry. NILM is used to reveal useful information about consumption breakdown by device or activity level, so it can be an important solution to show various smart home services and opportunities. For this purpose, deep learning is emerging as a prominent solution. This study proposes an efficient convolutional neural network (CNN) model for the fast and effective detection of electrical appliances used in residential buildings. A new CNN model with lower computational complexity Exponential Linear Unit (ELU) activation function is designed in the proposed model. Experimental studies were carried out with the data set containing the power consumption time series of 18 different electrical appliances used in residences. Short-Time Fourier Transform (STFT) converted preprocessing time series to color images. These images were then applied to the ESA for feature extraction and classification. In experimental studies, the accuracy, sensitivity, specificity, precision, and F1-score values of the proposed method were 94.78%, 87.371%, 99.70%, 90.5404, and 88.62%, respectively. In addition, the proposed method provided higher success rates of 1.78% and 1.98% in the accuracy criterion, one of the state-of-the-art methods, and 11.02% and 13.12% in the F1-score criterion.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22.05.2022
Düzeltilme: 8.10.2022
Kabul: 25.10.2022

Keywords

Detection of Household
Electrical Appliances,
Short-Term Fourier
Transform,
Deep Learning,
CNN

Anahtar Kelimeler

Elektrikli Ev Cihazlarının
Tespiti,
Kısa Süreli Fourier
Dönüşümü,
Derin Öğrenme,
Evrişimli Sinir Ağları

Konutlardaki Elektrikli Cihazların Evrişimli Sinir Ağı ile Otomatik Sınıflandırılması

Öz

Günümüzde teknolojik gelişmeler enerji kaynaklarına olan talebi büyük bir oranda artmaktadır. Özellikle konutlarda kullanılan elektrikli cihaz sayılarının artması endüstri de olduğu gibi konutlarda elektrik enerji tüketimini oldukça artmaktadır. Arz-talep dengesini etkili bir şekilde sağlanabilmesi konutlardaki elektriksel yüklerin tanımlanmasına ve müdahaleci olmayan yük izleme (MOYİ) sistemlerinin tasarımına bağlıdır. MOYİ sistemleri vasıtasıyla kullanıcıların, ev aletleri kullanım alışkanlıklarını kontrol edebilir ve ardından elektrik tasarrufu için davranışlarını ayarlayabilir. Bu nedenle, son zamanlarda MOYİ hem akademik hem de endüstride ilgi çeken bir konudur. MOYİ, cihaz veya aktivite seviyesindeki tüketim dökümü ile ilgili faydalı bilgileri ortaya çıkarmak için kullanılır, bu nedenle çeşitli akıllı ev hizmetleri ve fırsatlarını ortaya çıkarmak için önemli bir çözüm olabilir. Bu amaçla, derin öğrenme öne çıkan bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, konutlarda kullanılan elektrikli cihazların hızlı ve etkili bir şekilde tespit için etkin bir evrişimli sinir ağı (ESA) modeli önerilmiştir. Önerilen modelde, daha düşük hesaplama karmaşıklığına sahip exponansiyel lineer ünite (ELU) aktivasyon fonksiyonu içeren yeni bir ESA modeli tasarlanmıştır. Deneysel çalışmalar, konutlarda kullanılan 18 farklı elektrikli cihazların güç tüketim zaman serilerini içeren veri seti ile gerçekleştirilmiştir. Ön işlem zaman serileri, kısa süreli fourier dönüşümü (KSFD) ile renkli görüntülere dönüştürüldü. Daha sonra bu görüntüler özellik çıkarımı ve sınıflandırma için ESA'ya uygulandı. Yapılan deneysel

çalışmalarda önerilen yöntemin doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-skor değerleri sırasıyla %94,78, %87,371, %99,70, %90,5404 ve %88,62 olarak elde edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntem son teknoloji yöntemlerden doğruluk ölçütünde %1,78 ve %1,98, ayrıca F1-skor ölçütünde %11,02 ve %13,12 oranlarında daha yüksek başarımla sonuçlanmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son dönemlerde, teknolojik ve ekonomik gelişmeler ile birlikte enerji talebi de önemli oranda artmaktadır. Artan bu enerji talebinin karşılanabilmesi için sınırlı olan fosil yakıt kaynaklarının daha fazla kullanımına neden olmaktadır. Fakat bu durum daha fazla sera gazı salınımı ve küresel iklim değişimi gibi ciddi problemlere sebep olmaktadır. Bu nedenle özellikle gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler çeşitli yenilikçi, teknolojik, sürdürülebilir farklı enerji kaynakları arayışına yönelmekte diğer bir yandan da mevcut enerji kaynaklarının nasıl daha verimli kullanılabileceğini araştırmaktadır [1]. Enerjinin verimli kullanımı ve enerji maliyetlerinin en alt seviyeye düşürmek için tüm sanayii tesislerinde önemli çalışmalar yapılmakla birlikte dünyada en büyük enerji tüketicilerinden biri olan konutlarda bu çalışmalar istenilen seviyelerde değildir. Binalarda tüketilen enerji, dünya enerjisinin %40'ını ve karbondioksit emisyonları toplamın üçte birinden fazlasını oluşturmaktadır [2]. ABD'de elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %72'si binalarda harcanmaktadır [3]. Ayrıca hızlı nüfus artışı ve kırsaldan kentlere olan aşırı göç dikkate alındığında konutlardaki elektrik tüketiminin daha da artması muhtemeldir.

Konutlarda kullanılan elektrik enerjisi verimliliğini artırmak için enerji yönetimi ve ev otomasyonu gibi akıllı bina uygulamaları için detaylı enerji kullanım bilgilerinin sağlanması esastır. Bu bakımdan son zamanlarda araştırmacılar enerji dağıtım sisteminde cihaz düzeyinde güç tüketimlerini izlemek için müdahaleci olmayan yük izleme (MOYİ) tekniklerine yönelmektedirler [4]. MOYİ tekniği, bireysel cihazlara müdahaleci ve düşük maliyetli sensörler eklemeyen yükleri ayrıştırmak ve tanımlamak için akıllı algoritmalar kullanır [5]. Bu yaklaşım ile konut cihaz tespitindeki en önemli süreçlerden biri yük imza yapısıdır. Elektrik sinyallerinden oluşturulan temel olarak üç tür yük imzası vardır. Bunlar, gerçek güç ve reaktif güçteki değişiklikler, güç faktörü ve güç faz açısı gibi verilerdir [6]. Bu tür imzalar vasıtasıyla, konut cihazlarının güç tüketimi bakımından en iyi şekilde ayırt edilebilmekte ve bunları omik, endüktif ve kapasitif yükler olarak kolayca sınıflandırılır.

Literatürde, yük imzalarını kullanarak konutlardaki cihazların otomatik olarak tespitine yönelik çalışmalara son zamanlarda büyük bir ilgi olmuştur. Aggelos ve ark. [6] MOYİ algoritmalarının daha yüksek verimliliği için farklı yüklerde çalışmalar yapmışlardır. Üç farklı yük imzalarına sahip ve bunların mevcut dalga biçimlerinin analizlerini yapmışlardır. İki farklı ölçüm seti ile yüksek düzeyde verimli tanıma prosedürü geliştirerek test yapmışlar. Yapmış oldukları bu çalışma ile çevrimiçi ve gerçek zamanlı akıllı şebeke uygulamalarında kullanıma açık hale getirmişlerdir. Yuan ve ark. [7] Bayes sınıflandırması modeli ile yedi çeşit (buzdolabı, elektrikli ocak, klima, televizyon, dizüstü bilgisayar, çamaşır makinesi ve su sebili) ev aletlerinden aldıkları verilerden öznitelik çıkarımı yaparak güç tüketimini yeni algoritma ile uygulanabilirliğini test etmişlerdir. Koç ve ark. [8] elektrikli cihazların tespiti makine öğrenmesi yöntemlerini önermişlerdir. Çalışmalarında, yük modellerine göre elektrikli cihazların aktif ve reaktif güçlerini referans olarak destek vektör makinaları ve karar ağaçları yöntemleri ile elektrikli cihazları sınıflandırdılar. Deneysel çalışmalarda en yüksek doğruluk oranına %83,4 ile destek vektör makinaları ulaşılar.

Hasan ve ark. [9] cihaz profillerini tanımlamak için V-I yörünge tabanlı özellikleri referans alan önerdi. Yöntemde, akım-gerilim yörüngesinin çevrelediği alan, akım-gerilim ortalama yörünge eğrisinin doğrusal olmaması ve akım-gerilim yörüngesinin kesişim sayısı gibi dalga işaretleri öznitelik olarak kullanılmıştır. Bates ve ark. [10] cihaz işaretlerini tanımlamak için ağırlıklı piksel V-I görüntülerini kullandı ve akım-voltaj görüntüleri, cihaz sınıflandırması için bir ESA modeline uygulandı. Önerilen yöntemin etkinliği WHITED ve PLAID veri setleri ile test edilmiştir Athanasiadis ve ark. [11] konut cihazlarının aktif güç ölçümleri temel alan gerçek zamanlı bir model sunmuşlar. Bu model, cihazların çalışma konumunu belirleyen bir algoritma, ESA ve sınıflandırıcı olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Devlin ve ark. [12] konutlarda kullanılan cihazları tespit etmek için akıllı bir sayaç ölçümlerini çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağlarına dayalı bir yöntem önerdiler. Yöntem herkese açık olan akıllı sayaç

verileri ile test edilmiştir. Paiva ve ark. [13] MOYİ sistemlerinde konutlardaki elektrikli cihazları tespiti için ESA modellerine dayalı yaklaşım kullanımı önerdiler. 1Hz gibi düşük frekanslardaki REED veri setinden alınan veriler ile modellerini test ettiler.

Yapılan bu çalışmalarda, konutlardaki cihazların tespitinde önemli başarımlar sağlanmakla birlikte güç ile ilgili imzaların kullanımı dalga formunun seviye bilgilerini yok saymaktadır. Bu gerilim değişimleri olduğunda cihaz tespit başarımını negatif etkilemektedir. Araştırmacılar bu durumun üstesinden gelebilmek için güç tüketim sinyallerinin frekans ve zaman serisi özelliklerinden kullanmaya yöneldiler. Bazı çalışmalarda frekans alanındaki elektrik sinyali seyrekliği ve fourier dönüşümü kullanılarak hesaplanabilen akım harmonikleri gibi frekans alanı yük imzalarını kullandılar [14,15]. Le ve ark. [16] konutlarda kullanılan cihazları tespitinde, yük izlerinden hızlı fourier dönüşümü ile tek sayılı harmonikleri seçerek öznelik çıkarımı yaptılar. Daha sonra bu öznelikler torbalama karar ağacına uygulayarak sınıflandırmaya çalıştılar. Liu ve ark. [17], zaman serisi özelliklerine dayalı hibrit model tasarlamışlardır. Hibrit model olarak diğer prensiplerden farklı olarak zaman serisi öznelik kullanmışlar. Genişletilmiş PLAID veri seti ile doğrulama olarak daha iyi performans elde etmişlerdir. Christoforos ve ark. [18] çok etiketli MOYİ için zaman serisi gösteriminde bulunmuşlardır. Signal2Vec kullanarak iki popüler veri kümesi üzerinde değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Böylelikle gömülü cihazlara entegre ederek gizlilik sağlanabilir olduğunu test etmişlerdir.

Yukarıdaki çalışmalar incelendiğinde, konutlardaki cihazların tespitinde çok sayıda sınıflandırma algoritması çalışılmış olmasına rağmen, sınıflandırıcılar oluşturulurken sınıf dengesizliği sorununa çok az dikkat edilmiştir. Bununla birlikte cihazların çalışma frekansı değiştiğinden, bu sorun daha zor bir hale dönüşmektedir [19].

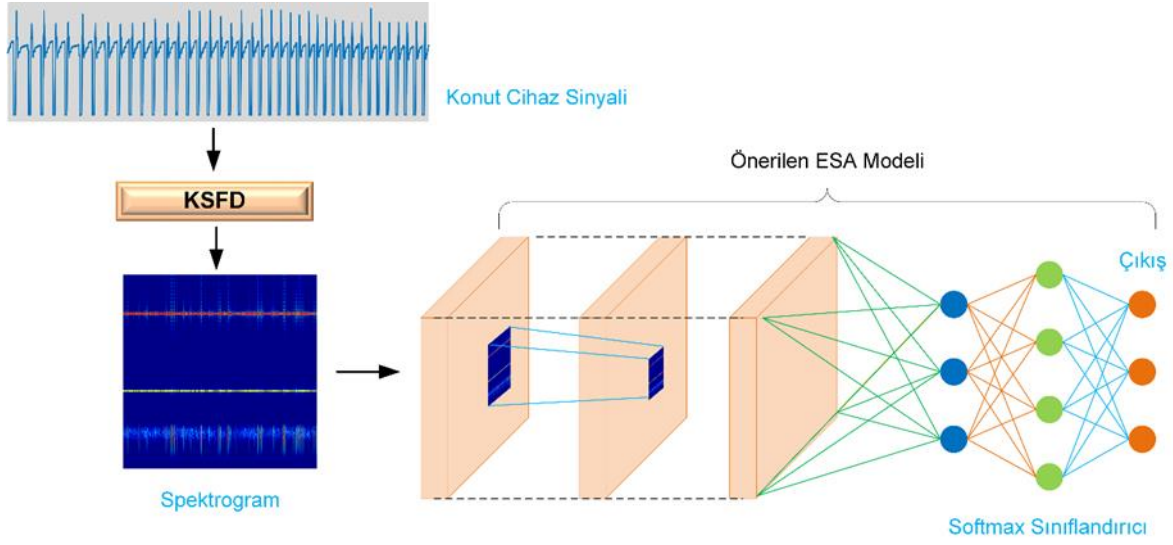
Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen problemlerin çözümü için konutlarda kullanılan cihazların zaman serisi özelliklerini referans alan derin öğrenme tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Genel olarak önerilen yaklaşım ön işlem ve öznelik çıkarımı, sınıflandırma olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır.

Ön işlem aşamasında konut cihazlarına ait zaman serileri Kısa Süreli Fourier Dönüşüm (KSFD) ile görüntüye dönüştürüldü. Ardından öznelik çıkarımını ve sınıflandırma için yeni geliştirilen ESA mimarisine uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin konutlarda kullanılan cihazları etkili bir şekilde sınıflayabildiğini göstermektedir. Ayrıca önerin yöntem basit, hızlı ve düşük boyutlu olması gibi avantajları dikkate alındığında gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımı potansiyeline sahiptir.

Çalışmanın geri kalan kısmı; kullanılan veri seti, uygulanan yöntemler, deneysel çalışmalar ve sonuçlar, doğrultusunda tartışma ve sonuç bölümlerinden oluşmaktadır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Bu çalışmada, konutlarda kullanılan elektrik cihazların otomatik tespiti için yeni bir ESA modeli sunulmaktadır. Şekil 1'de genel yapısı görülen yöntemin ön işlem aşamasında, frekans değişimlerine daha duyarlı KSFD ile 18 adet konut cihazlarına ait 916 örnekten oluşan zaman serileri görüntüye dönüştürüldü. Ardından bu görüntüler önerilen ESA model girişine uygun olarak 224x224x3 olarak yeniden boyutlandırıldı. Daha sonra bu görüntüler öznelik çıkarımı ve sınıflandırma için yeni oluşturulan 26 katmanlı ESA modeline uygulanarak konutlarda kullanılan cihazların otomatik tespiti yapılmaktadır.



Şekil 1. Önerilen yöntemin genel yapısı

2.1. Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada, ev aletlerinin güç ve reaktif güç profilleri ile ilgili yüksek çözünürlüklü veri seti kullanılmıştır [20]. Veri seti detayları Tablo 1’de verilen ve Avrupa’da konutlarda yaygın olarak kullanılan 18 farklı elektrikli cihazı içermektedir. Çamaşır makinesi, ekmek kızartma makinesi, ütü, saç kurutma makinesi ve klima gibi elektrikli cihazların aktif güç tüketimi verileri iki aylık (Aralık 2018 ve Ocak 2019) olarak ölçülmüştür. Isı pompasının farklı çalışma konumlarına ait aktif ve reaktif güç tüketimleri ile elektrikli bisiklet ve akülü aracın şarj tüketimleri Avrupa Komisyonu Ortak Araştırma Merkezi’nin (JRC) akıllı şebeke birlikte çalışabilirlik laboratuvarındaki (SGILab) ölçümlerinden alınmıştır [21].

Tablo 1. Elektrikli Cihazlar ve Özellikleri

| No | Elektrikli Cihazlar | Güç (W) | Örnek Sayısı |
|----|---------------------|---------|--------------|
| 1 | Klima | 1400 | 120 |
| 2 | Test cihazı (Test) | | 6 |
| 3 | Akülü Araç | 6600 | 120 |
| 4 | Bulaşık Makinası | 2100 | 24 |
| 5 | Kurutucu | 2300 | 6 |
| 6 | Buzdolabı | 170 | 168 |
| 7 | Saç Kurutma | 2100 | 44 |
| 8 | Isı pompası | 2600 | 20 |
| 9 | Ütü | 2200 | 12 |
| 10 | Led Lamba | 60 | 8 |
| 11 | Flüorsan Lamba | 200 | 8 |
| 12 | Bilgisayar | 500 | 78 |
| 13 | Fırın | 2200 | 72 |
| 14 | Televizyon | 108 | 82 |
| 15 | Tost Makinası | 700 | 48 |
| 16 | Su Isıtıcısı | 400 | 12 |
| 17 | Çamaşır Makinası | 2300 | 28 |
| 18 | Elektrikli Bisiklet | 200 | 60 |

2.2. Kısa Süreli Fourier Dönüşümü (Short-time Fourier Transform)

Bir zaman serisinin frekans dağılımını analiz etmek için Fourier dönüşümü genellikle en etkili yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Fakat bu dönüşümden sonra zaman bilgisi kaybolmaktadır. Sonuç olarak, sinyaldeki ani değişikliklerin belirlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Literatürde, hem zaman hem de frekans bilgisinin gerekli olduğu KSFD ve Wigner-Ville dönüşümü (WVT) gibi çok çeşitli uygulamalar vardır [22]. KSFD, zaman serilerindeki frekans ve faz değişimini ölçmek için Gabor tarafından önerilen bir yöntemdir [23]. Bu yöntem temel olarak tüm zaman serilerini bir kerede düşünmek yerine, kısa zaman aralıklarında (kayan bir pencerede) bir zaman serisinin frekans bileşenlerini temsilini sağlamaktadır [24]. Bu tür temsilleri zaman içinde birleştirmek, bir dalga biçiminin zaman ve frekansın 2 boyutlu bir fonksiyonu olarak görselleştirilmesine izin verir [25].

Verilen bir x zaman serisi ve ilgili KSFD gösterimi f göz önüne alındığında şu şekilde hesaplanır:

$$f(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

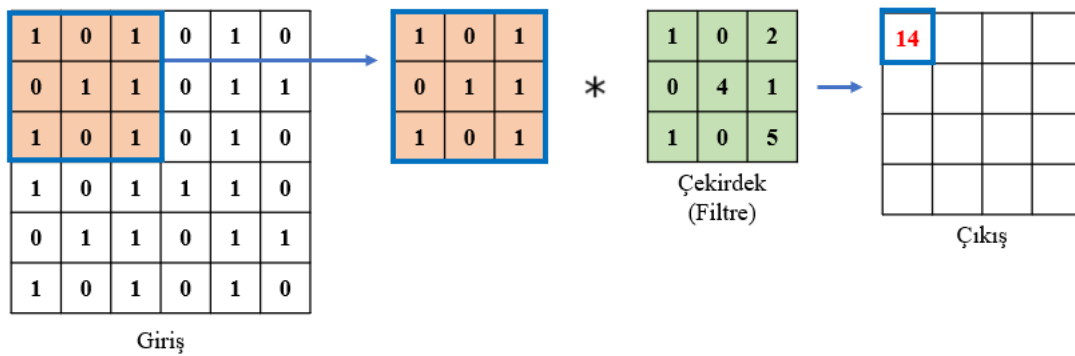
burada ω , τ zamanında ortalanmış bir pencere fonksiyonudur. Ayrıca kayan pencereli KSFD temsilinin kare büyüklüğü, $|f(\tau, \omega)|^2$ genel olarak spektrogram olarak adlandırılır [26].

2.3. Evrişimli Sinir Ağları (Convolution Neural Network)

Geleneksel Makine Öğrenme (MÖ) teknikleri kullanarak sınıflandırma sürecinde, ön işleme, özellik çıkarma, akıllı özellik seçimi, öğrenme ve sınıflandırma olmak üzere birkaç ardışık süreci gerektirmektedir. Ayrıca, özellik seçiminin makine öğrenimi tekniklerinin performansı üzerinde büyük etkisi vardır [27]. Ayrıca önyargılı özellik seçimi, sınıflar arasında yanlış ayırım yapılmasına neden olabilmektedir. Fakat Derin Öğrenme (DÖ), geleneksel MÖ yöntemlerinden farklı olarak, çeşitli görevler için özellik setlerinin öğrenilmesini otomatikleştirebilmektedir [28,29]. DÖ, öğrenme ve sınıflandırmanın tek seferde elde edilmesini imkan sağlayabilmektedir [27]. DÖ ağları genellikle tekrarlayan sinir ağları ve ESA olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Bununla birlikte ESA'lar, herhangi bir insan denetimi olmadan önemli özellikleri otomatik olarak algılama yetenekleri nedeni ile araştırmacılar tarafından yaygın olarak tercih edilmektedir [27].

ESA tipik bir sinir ağı gibi katmanlar halinde organize edilen ve hiyerarşik temsilleri öğrenebilen nöronlara dayanır [30]. Genel olarak bir ESA modeli evrişim, havuzlama, tam bağlı ve softmax katmanlarından oluşur.

Evrişim Katmanı: ESA mimarisinde en önemli katmandır. Bir dizi evrişimsel filtreden (çekirdekler olarak adlandırılır) oluşur. N boyutlu olarak ifade edilen girdi görüntüsü, çıktı özellik haritasını oluşturmak için Şekil 2'de görüldüğü üzere (3×3 , 5×5 , 7×7 gibi) farklı boyutlardaki filtrelerle konvüle edilir [31].



Şekil 2. Konvolüsyon işlemi

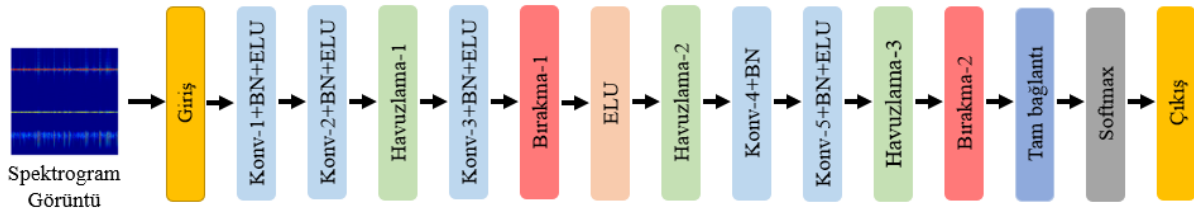
Havuzlama Katmanı: Bu katmanın ana görevi, özellik haritalarının alt örneklenmesidir. Bu haritalar, evrişim işlemleri takip edilerek oluşturulur. Başka bir deyişle, bu yaklaşım, daha küçük özellik haritaları oluşturmak için büyük boyutlu özellik haritalarını küçültür. Eşzamanlı olarak, havuzlama aşamasının her

adımında baskın bilgilerin (veya özelliklerin) çoğunluğunu korur. Ortalama, minimum ve maksimum havuzlama gibi çeşitli havuzlama yöntemleri mevcuttur [27].

Tam Bağlantılı Katman: Bu katman, genellikle ESA mimarisinin sonunda yer almaktadır. Bu katmanın içinde, her nöron, bir önceki katmanın tüm nöronlarına bağlanır. Bir tür ileri beslemeli yapay sinir ağında olduğu için geleneksel çok katmanlı algılayıcı sinir ağının temel yöntemini izler. Tam bağlantılı katmanın girişi, son havuzlama veya evrişim katmanından gelir. Bu girdi, düzleştirmeden sonra özellik haritalarından oluşturulan bir vektör biçimindedir [32,33].

Softmax: son tam bağlantılı katmandan elde edilen özelliklerin sınıflandırılmasını sağlamaktadır. Sınıflandırma işleminde olasılıksal değerler kullanılarak ilgi sınıfa atama işlemi yapılır [31].

Bu çalışma, popüler ve sıklıkla kullanılan ön eğitilmiş ESA mimarileri yerine daha düşük kapasiteli donanımlarda kullanılabilen basit ve daha düşük hesaplama karmaşıklığına sahip etkili bir ESA mimarisi önerilmiştir. Genel yapısı Şekil 3'te görülen bu mimaride daha az parametreye sahip konvolüsyon katmanlar ve ReLU fonksiyonu yerine ELU fonksiyonu kullanan aktivasyon katmanlarına sahiptir.



Şekil 3. Önerilen ESA modeli

2.4. Değerlendirme Ölçütleri (Evaluation Criteria)

Önerilen yöntem sonuçlarını analiz etmek doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-skor parametreleri kullanılmıştır. Bu parametreler önerilen modelin sınıflandırma sonuçlarına göre etiketlenen sınıf değeri ile gerçek sınıf değeri arasındaki ilişkiye göre belirlenir. Bunun için Tablo 2'de verilen karmaşıklık matrisinden faydalanılmıştır.

Tablo 2. Karmaşıklık matrisi

| Karmaşıklık Matrisi | | Tahmin Edilen Sınıf | |
|---------------------|---------|---------------------|---------------------|
| | | Pozitif | Negatif |
| Gerçekteki Sınıf | Pozitif | Doğru Pozitif (DP) | Yanlış Negatif (YN) |
| | Negatif | Yanlış Pozitif (YP) | Doğru Negatif (DN) |

Performans değerlendirme ölçütleri Denklem 2-6'daki bağıntılar ile hesaplanmaktadır [33].

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + DN + YP + YN} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Duyarlılık (Geri Çağırma)} = \frac{DP}{DP + YN} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Özgüllük (Seçicilik)} = \frac{DN}{DN + YP} \times 100 \quad (4)$$

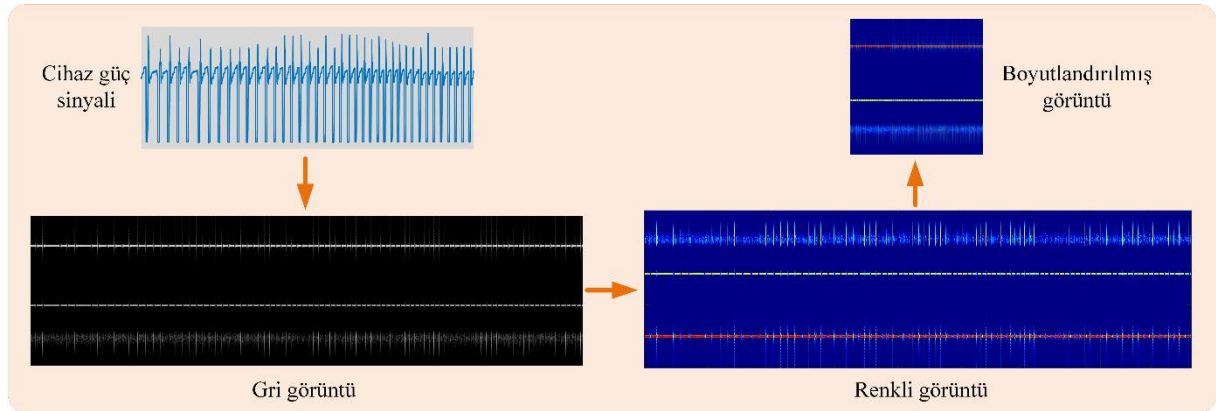
$$Keskinlik = \frac{DP}{DP + YP} \times 100 \quad (5)$$

$$F1 Skor = \frac{Duyarluluk \times Keskinlik}{Duyarluluk + Keskinlik} \times 100 \quad (6)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

Bu bölümde, konutlarda kullanılan elektrikli cihazların tespiti ve cihazların sınıflandırılması için deneysel kurulum ve deneysel sonuçlar hakkında kısa bilgiler sunulmaktadır. Deneyler, Intel Xeon Silver 3.3 GHz işlemci, 32 GB RAM, NVIDIA P2200 Quadro GPU kartı ve MATLAB 2020a yazılımı ile donatılmış iş istasyonunda gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmaların ilk aşamasında zaman serileri KSFD ile görüntüleme dönüştürüldü. Veri setindeki elektrikli cihazlara ait zaman serilerinden spektrogram görüntülerini oluşturmak için deneysel olarak belirlenen 200ms'lik Hamming penceresi kullanıldı ve FFT sayısı 1000 olarak seçilmiştir. Bu değerlere göre 1×86400 boyutlarındaki her bir zaman serisi detayları Şekil 4'de görüldüğü gibi önce 251×1727 boyutlarında gri görüntüye dönüştürüldü. Daha sonra gri görüntüdeki piksel parlaklığı ve kontrast değerlerindeki değişimler homojen olarak değişen bir jet128 renk haritası ile renklendirilerek $251 \times 1727 \times 3$ renkli spektrogram görüntüye dönüştürüldü ve son olarak önerilen ESA model girişine uygun olarak $224 \times 224 \times 3$ olarak yeniden boyutlandırıldı.



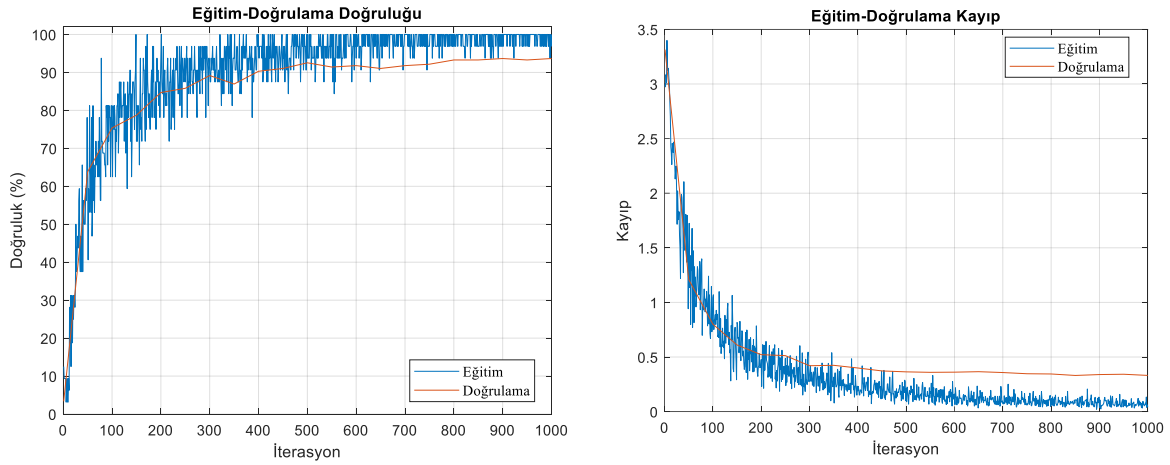
Şekil 4. Zaman serilerinden spektrogram görüntülerinin elde edilmesi

Deneysel çalışmaların ikinci aşamasında, önerilen ESA modeli ile öznelik çıkarımı cihazların sınıflandırılması için elde edilen görüntülerin %70'i (648 görüntü) eğitim ve %30'u (268 görüntü) test için ayrılmıştır. Eğitim verileri önerilen ESA modelinin eğitilmesi ve test verileri önerilen ESA model parametrelerinin belirlenmesi hem de performans değerlendirmesi amacıyla kullanıldı. ESA modelinin eğitim sürecinde modele ait en iyi parametrelerinin belirlenmesi deneyler birkaç kez tekrar edildi ve belirlenen ESA model eğitim parametreleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. ESA model eğitim parametreleri

| Optimizasyon | Öğrenme Oranı | Maksimum Tekrar Sayısı | Minimum Yığın Sayısı | Doğrulama Frekansı |
|--------------------------------|---------------|------------------------|----------------------|--------------------|
| Stokastik Gradyan Azalma (SGD) | 10^{-3} | 50 | 32 | 50 |

Tablo 3'de verilen eğitim parametrelerine göre önerilen ESA modelinin eğitim ve sınıflandırma süreçlerine ait eğitim-doğrulama ve eğitim kayıp grafikleri Şekil 5'te görülmektedir.



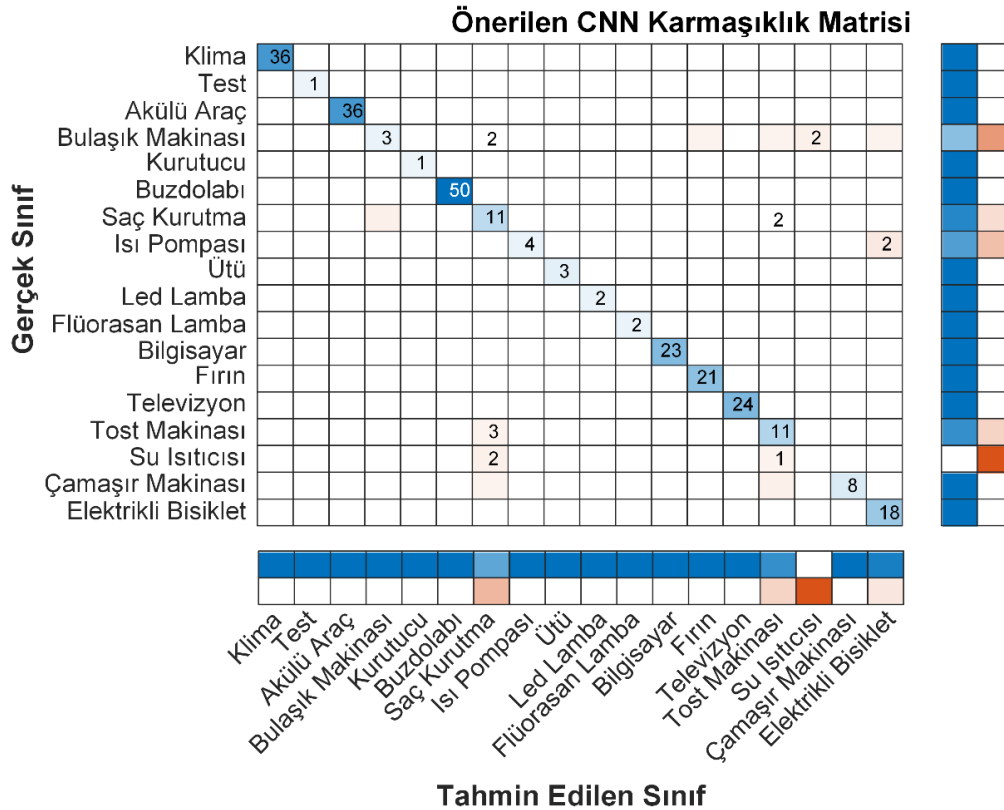
Şekil 5. ESA modelinin doğruluk ve kayıp eğrileri

Şekil 5’de görüleceği üzere ESA model eğitimi 1000 iterasyonda 0,5’ten düşük eğitim doğrulama kaybı ile tamamlanmıştır. Tablo 4’te önerilen ESA modelinin performans sonuçlarına göre %94,78’lik bir doğruluk oranı ve %99,70’lik özgüllük skoru elde edildiği görülmektedir.

Tablo 4. Önerilen ESA model performans sonuçları (%)

| Doğruluk | Duyarlılık | Özgüllük | Keskinlik | F1 Skor |
|----------|------------|----------|-----------|---------|
| 94,78 | 87,37 | 99,70 | 90,54 | 88,62 |

Ayrıca Şekil 6’da test verilerin karmaşıklık matrisleri görülmektedir. Şekil 6 detaylı incelendiğinde bulaşık makinası, saç kurutma, ısı pompası, tost makinası ve su ısıtıcısı dışındaki tüm elektrikli cihazlar doğru bir şekilde tahmin edilmiştir.



Şekil 6. Önerilen ESA modeline ait karmaşıklık matrisi

Gerçekte bulaşık makinası olan ikişer adet test verileri sırasıyla saç kurutma ve su ısıtıcısı olarak hatalı sınıflandırılmıştır. Gerçekte saç kurutma olan iki test verisi, tost makinası olarak hatalı tahmin edilmiştir. Bununla birlikte gerçekte 3 tost makinası ve 2 su ısıtıcı test verisi hatalı bir şekilde saç kurutma ve bir su ısıtıcı test verisi hatalı şekilde tost makinası olarak sınıflandırılmıştır.

Önerilen yöntemin veri setindeki her bir cihaz ait daha detaylı performans analizi Tablo 5’de görülmektedir. Tablo 5’deki doğruluk oranlarına bakıldığında en düşük başarımla %96,25 saç kurutma, %97,76 tost makinası, %98,13 su ısıtıcısı ve %99,25 ile ısı pompası ve elektrikli bisiklette görülmektedir. Diğer cihazlar %100 doğruluk oranlarına sahiptir.

Tablo 5. Önerilen modelin her bir cihaza ait performans sonuçları

| Elektrikli Cihaz | Doğruluk (%) | Duyarlılık (%) | Özgüllük (%) | Keskinlik (%) | F1 Skor |
|---------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|---------|
| Klima | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Test cihazı (Test) | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Akülü Araç | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Bulaşık Makinası | 98,51 | 100,00 | 98,49 | 100,00 | 1,00 |
| Kurutucu | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Buzdolabı | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Saç Kurutma | 96,22 | 61,11 | 99,09 | 61,11 | 0,61 |
| Isı pompası | 99,25 | 100,00 | 99,24 | 100,00 | 1,00 |
| Ütü | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Led Lamba | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Flüorsan Lamba | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Bilgisayar | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Fırın | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Televizyon | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Tost Makinası | 97,76 | 78,57 | 98,82 | 78,57 | 0,79 |
| Su Isıtıcısı | 98,13 | 0,00 | 98,87 | 0,00 | 0,00 |
| Çamaşır Makinası | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 1,00 |
| Elektrikli Bisiklet | 99,25 | 90,00 | 100,00 | 90,00 | 0,90 |

Tablo 6. Önerilen yöntemin son teknoloji yöntemler ile performans karşılaştırması

| Yöntem | Veri Seti | Elektrikli Cihaz Sayısı | Doğruluk | Özgüllük | F1 Skor |
|---------------------------|-------------------|-------------------------|----------|----------|---------|
| Athanasiadis ve diğ. [10] | WHITED | 22 | - | - | 0.755 |
| Devlin ve Hayes [12] | UK-DALE | 7 | - | - | 0.776 |
| Paiva Penha ve diğ. [13] | REDD | 6 | 0.9300 | - | 0.930 |
| Le ve diğerleri [16] | PLAID | 11 | 0.9280 | - | 0.924 |
| Önerilen yöntem | Yüksek Çözünürlük | 18 | 0.9478 | 0,9970 | 0.8862 |

Önerilen yöntemin detaylı performans analizi için benzer veri setlerinin kullanıldığı son teknoloji yöntemler ile performans karşılaştırmaları Tablo 6'da görülmektedir. Tablo 6'da görüldüğü üzere veri setlerindeki cihaz sayıları farklılık göstermektedir. Bununla birlikte önerilen yöntem %94,78 doğruluk oranı ile son teknoloji yöntemlerden daha başarılı olduğu görülmektedir. Önerilen yöntem [13] ve [16] çalışmalardan sırasıyla %1,78 ve %1,98 daha yüksek doğruluk oranına sahiptir. Ayrıca [10] ve [12] çalışmalardan sırasıyla %13,12 ve %11,02 daha yüksek F1 skor değerine sahiptir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, konutlarda kullanılan elektrikli cihazların otomatik olarak sınıflandırılması için yeni bir derin öğrenme modeli önerilmiştir. Önerilen model, klasik ESA modellerindeki RELU aktivasyon fonksiyonu yerine ELU aktivasyon fonksiyonu kullanılan yeni bir ESA modeli ile sınıflandırma başarımının artırılması hedeflenmiştir. Çalışma ön işlem, öznitelik çıkarma ve sınıflandırma gibi aşamalardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda, halka açık konutlarda kullanılan elektrikli cihazlara ait zaman serileri kullanılmıştır. Bu zaman serileri önerilen ESA modeline uygun olarak renkli görüntülere dönüştürmüştür. Daha sonra cihazların otomatik amacıyla bu görüntüler ESA modeline uygulanarak özellik çıkarımı ve sınıflandırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, %94,78 doğruluk ile cihazlar sınıflandırılmıştır. Önerilen yöntem veri setindeki 18 farklı cihazın 12'sini %100 doğrulukta tespit etmiştir. Ayrıca son teknoloji yöntemler ile karşılaştırıldığında daha yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, konutlarda kullanılan farklı çalışma fonksiyonlarına sahip cihaz türleri ve çalışma konumlarının belirlenmesi planlanmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje No: 121E347) tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Alzubaidi, L., Zhang, J., Humaidi, A. J., Al-Dujaili, A., Duan, Y., Al-Shamma, O., Santamaría, J., Fadhel, M. A., Al-Amidie, M., & Farhan, L. (2021). Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions. *Journal of Big Data*, 8(1), 53.
- [2] Aslan, M. (2021). Derin Öğrenme ile Şeftali Hastalıklarının Tespiti. *European Journal of Science and Technology*, 23, 540–546.
- [3] Aslan, M. (2022). Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 399-407.
- [4] Athanasiadis, C., Doukas, D., Papadopoulos, T., & Chrysopoulos, A. (2021). A scalable real-time non-intrusive load monitoring system for the estimation of household appliance power consumption. *Energies*, 14(3), 767.
- [5] Bouhouras, A. S., Milioudis, A. N., & Labridis, D. P. (2014). Development of distinct load signatures for higher efficiency of NILM algorithms. *Electric Power Systems Research*, 117, 163–171.
- [6] De Baets, L., Develder, C., Dhaene, T., Deschrijver, D., Gao, J., & Berges, M. (2018). Handling imbalance in an extended plaid. *5th IFIP Conference on Sustainable Internet and ICT for Sustainability, SustainIT 2017*, 1–5.

- [7] De Baets, L., Ruyssinck, J., Develder, C., Dhaene, T., & Deschrijver, D. (2018). Appliance classification using VI trajectories and convolutional neural networks. *Energy and Buildings*, 158, 32–36.
- [8] Demir, F., Abdullah, D. A., & Sengur, A. (2020). A New Deep CNN Model for Environmental Sound Classification. *IEEE Access*, 8, 66529–66537.
- [9] Devlin, M. A., & Hayes, B. P. (2019). Non-Intrusive Load Monitoring and Classification of Activities of Daily Living Using Residential Smart Meter Data. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 65(3), 339–348.
- [10] Du, L., Restrepo, J. A., Yang, Y., Harley, R. G., & Habetler, T. G. (2013). Nonintrusive, self-organizing, and probabilistic classification and identification of plugged-in electric loads. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(3), 1371–1380.
- [11] Gabor, D. (1946). Theory of communication. part 1: The analysis of information, *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III: Radio and. Communication Engineering*, 93(26), 429–441.
- [12] Ghaderpour, E., Pagiatakis, S. D., & Hassan, Q. K. (2021). A survey on change detection and time series analysis with applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13), 6141.
- [13] Hassan, T., Javed, F., & Arshad, N. (2014). An empirical investigation of V-I trajectory based load signatures for non-intrusive load monitoring. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(2), 870–878.
- [14] Joint Research Center. (2018). The smart grid interoperability laboratory. European Research Center.
- [15] Kattenborn, T., Leitloff, J., Schiefer, F., & Hinz, S. (2021). Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 173, 24–49.
- [16] Koç, F., ve Karabiber, A. (2021). Makine Öğrenmesi Yöntemleri Kullanılarak Elektrikli Cihazların Sınıflandırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*.
- [17] Kryonidis, G. C., Barzegkar-Ntovom, G. A., Papadopoulos, T. A., Marinopoulos, A. G., Covrig, C. F., Doukas, D. I., & Kontis, E. O. (2020). A Bottom-up Modelling Approach for Household Power Profiles Using Time-series Measurements. *UPEC 2020-2020 55th International Universities Power Engineering Conference, Proceedings*, 1–6.
- [18] Le, T. T. H., Kang, H., & Kim, H. (2020). Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree. *IEEE Access*, 8, 55937–55952.
- [19] Lecun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- [20] Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141, 2445–2457.
- [21] Lin, S., Zhao, L., Li, F., Liu, Q., Li, D., & Fu, Y. (2016). A nonintrusive load identification method for residential applications based on quadratic programming. *Electric Power Systems Research*, 133, 241–248.
- [22] Liu, H., Wu, H., & Yu, C. (2019). A hybrid model for appliance classification based on time series features. *Energy and Buildings*, 196, 112–123.
- [23] Liu, Y., Wang, X., Zhao, L., & Liu, Y. (2018). Admittance-based load signature construction for non-intrusive appliance load monitoring. *Energy and Buildings*, 171, 209–219.

- [24] Meehan, P., McArdle, C., & Daniels, S. (2014). An efficient, scalable time-frequency method for tracking energy usage of domestic appliances using a two-step classification algorithm. *Energies*, 7(11), 7041–7066.
- [25] Nalmpantis, C., & Vrakas, D. (2020). On time series representations for multi-label NILM. *Neural Computing and Applications*, 32(23), 17275–17290.
- [26] Paiva Penha, D. de, & Garcez Castro, A. R. (2018). Home Appliance Identification for Nilm Systems Based on Deep Neural Networks. *International Journal of Artificial Intelligence & Applications*, 9(2), 69–80.
- [27] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [28] Samiee, K., Kovács, P., & Gabbouj, M. (2015). Epileptic seizure classification of EEG time-series using rational discrete short-time fourier transform. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(2), 541–552.
- [29] Sejdić, E., Djurović, I., & Jiang, J. (2009). Time-frequency feature representation using energy concentration: An overview of recent advances. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 19(1), 153–183.
- [30] Shrestha, A., & Mahmood, A. (2019). Review of deep learning algorithms and architectures. *IEEE Access*, 7, 53040–53065.
- [31] Turkoglu, M., Alcin, O. F., Aslan, M., Al-Zebari, A., & Sengur, A. (2021). Deep rhythm and long short term memory-based drowsiness detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 65(October 2020), 102364.
- [32] Yan, D., Jin, Y., Sun, H., Dong, B., Ye, Z., Li, Z., & Yuan, Y. (2019). Household appliance recognition through a Bayes classification model. *Sustainable Cities and Society*, 46, 101393.
- [33] Yoon, S. H., Kim, S. Y., Park, G. H., Kim, Y. K., Cho, C. H., & Park, B. H. (2018). Multiple power-based building energy management system for efficient management of building energy. *Sustainable Cities and Society*, 42(May), 462–470.



Critical Aspects and Technology of Fixed Automated Spray Technology System

İsmet KILIÇ¹  Meral ÖZARSLAN YATAK^{2,*}  Fecir DURAN³ 

¹Ertuğrulgazi Anatolian High School, 41180, Kartepe/KOCAELİ

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronic Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³Gazi University, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Article Info

Research article
Received: 13.05.2022
Revision: 22.08.2022
Accepted: 16.09.2022

Keywords

Anti-icing
Anti-icing chemical
Deicing
Fixed Automated Spray
Technology

Abstract

Fixed automated spray technology (FAST) has been used for years in practice and theory both in Turkey and globally as an alternative to the conventional method for struggling against snow and ice on highway superstructure. The purpose of the FAST system is a proactive approach to reduce or even eliminate the impact of snow and ice factors that negatively affect the skid resistance on highway superstructure. This approach also plays an important role in decreasing the traffic accidents occurring on highways, prolonging the service life of the construction, and minimizing the damage to the environment caused by the conventional system. In light of this information, in this study, critical aspects of FAST system, its components, technological features, design, and installation in terms of environmental factors are investigated. In addition, the advantages and disadvantages of the system in the struggle against snow and ice have been revealed. As a result, the superiority of FAST, which is a product of a multidisciplinary study, in the prevention of accidents caused by low skid resistance on the highway for the struggle against snow and ice over the conventional methods, economic evaluation of the FAST system, assessment of the components as technically, and criteria of determination of FAST components are put forward.

1. INTRODUCTION

Road transport is one of the most important transportation modes in Turkey and the world. The relationship between a safe drive and skid resistance on highways has been the subject of research from the past to the present day scientists. Safety, one of the most important parameters of engineering, is an inevitable parameter in terms of safe driving on highways. The three main factors that affect safe driving are people, vehicles and roads. When the road factor is considered, the value of skid resistance is in the foreground. To ensure a safe drive, the skid resistance between the vehicle's road surface and wheel bandage must be at a specific level. Studies have shown that there is an important relationship between the decline in skid resistance and traffic accidents [1].

Preventing icing on critical road sections, especially bridges and viaducts, is one of the most important issues to facilitate transportation in winter and ensure traffic safety. In winter months, the slip ratio-friction coefficient decreases considerably due to the icing on the bridges that lowering traffic safety. Studies show that the reduction in friction resistance increases traffic accidents. Xiao et al. [2] examined the relationship between skid resistance and traffic accidents. They showed that traffic accidents decrease by 60% when the skid resistance value of the road surface increases from 33,4% to 48%. The causes of 10%–15% of all traffic accidents are serious weather conditions and this leads to tremendous economic losses and casualties [3]. To eliminate negative effects on the road surface such as snow and icing, physical and chemical struggle methods are traditionally applied after the snowfall and for this reason these methods are called passive. The most effective method for snow-ice struggle is to employ an active melting system that starts operating before the snow-ice event occurs. The most important anti-icing and de-icing system technology are called as Fixed Automated Spray Technology (FAST). The FAST system was developed to struggle against snow

and ice. This is a method that can obtain data from the ice warning system and intervene instantly. An appropriate amount of anti-icing chemical is sprayed from nozzles to the pavement automatically and thereby preventing ice adhesion to the pavement by creating a chemical layer between ice and pavement [4, 5].

Struggle against snow and ice is very important for safety but the damage of excessive use of chemicals to the environment, the coating, and the other structures shouldn't be ignored. Attention should be paid not only to the struggle against to snow and ice but also to the conditions after this process. Nowadays, innovative studies to eliminate the problems caused by traditional methods in preventing icing and eliminating the deficiencies of existing systems are being carried out rapidly to optimize the amount of chemicals. FAST uses the optimum amount of chemicals for struggle and so it is very environmentally friendly.

There are two ways to struggle against icing [6]. The first one is the process of removing ice and snow after formation called "de-icing" and the second one is the process of precaution for the pavements before icing called "anti-icing. De-icing needs more sources of chemicals, cost, human force, time, etc. than anti-icing. So anti-icing is more friendly to the environment than the other methods. Applying chemical freezing-point depressants to the pavement in advance of or during deteriorating weather conditions is called Anti-icing. Black ice formation and the bond between ice and the road surface are prevented or weakened with anti-icing [7].

Winter maintenance activities are analyzed from the perspectives of materials and costs and this is greatly beneficial to providing agencies with correct snow and ice control instructions [8]. FAST systems take place in markets especially in North America and Europe implemented with the support of universities and/or transport ministries. Veneziano et al. [9] used the empirical Bayes technique for the before-after study, so they could determine the effect of FAST systems on crash frequencies. The results showed that at sites where crashes were reduced, FAST systems contributed to an annual reduction of 2% of crash frequency on multilane rural highways, 16% to 70% on urban Interstates, 31% to 57% on rural Interstates, and 19% to 40% on interchange ramps between Interstates. This study presented that high-traffic, high-crash severity locations are most suitable for FAST deployment. Akin et al. [10] measured snow-pavement bond strength and static friction to determine the effectiveness of anti-icing with salt brine and deicing with dry and pre-wet solid salt on permeable friction course surface (PFS). They showed that compacted snow bonds more strongly to PFSs, yet friction of PFSs was significantly greater than dense-graded pavements after snow removal, even without the use of salt. Hereby, practitioners may apply unnecessarily high application rates of salt. To overcome this, field testing is proposed to better understand the frictional behavior of PFSs during a variety of winter storm conditions and deicer application strategies. In addition, there are other potentially useful attributes such as decreasing the corrosion potential on a given structure through the use of low corrosion snow and ice control materials, and decreasing the deleterious effects of winter maintenance activities on the surface and groundwater quality through the use of alternative snow and ice control materials [11].

Development of system components, decrease in cost, and reduction in traffic accidents with death and injury caused by icing, traffic accidents, and benefit-cost ratio reveal the importance of the system. Eliminating even one accident in one year would provide a benefit-cost ratio greater than 1 for two automated systems installed for the Minnesota Department of Transportation bridge locations [12].

Ratkevičius and Laurinavičius [13] claims that cost-benefit analysis results showed that the road maintenance costs in the winter season of 2011–2014 made up only approximately 4% of the total societal expenses compared to the expenses incurred by the society during road accidents and travel time expenses. So FAST is a system that is worth studying and whose critical expectations should be taken into account in the design.

Sand-salt mix and applying anti-icing chemicals to road by trucks have many disadvantages. Particularly damage to the environment and infrastructure, requirement of human source, and struggling after ice forming are serious drawbacks. Applying anti-icing chemical to roads by trucks has some problems such as the requirement of human source, not struggling immediately, and not adjusting the amount of chemical. The bottom heating system doesn't affect the environment adversely. But the long time for the de-icing duration, the excess infrastructure cost, and practice cost are disadvantages of this system. Despite the

infrastructure cost of the FAST system, it is the most effective method. Methods of struggle against icing show differences in relation to response time, de-icing duration, effect duration, temperature, cost, environmental effects, etc. FAST and the other methods are presented in Table 1 comparatively.

Table 1. Properties of anti-icing and de-icing methods

| METHOD | HUMAN FORCE | RESPONSE TIME | DEICING DURATION | EFFECT DURATION | EFFECT TEMPERATURE | INFRASTRUCTURE COST | PRACTICE COST | IMPACT ON ENVIRONMENT & INFRASTRUCTURES TRUTURE | ANTIICING / DEICING |
|---|-------------|---------------|------------------|-----------------|------------------------|---------------------|---------------|---|---------------------|
| FAST | No | Immediately | Short | Long | -40 °C | Medium | Low | Harmless | A-icing D-icing |
| SAND-SALT MIX | Yes | Late | Long | Short | -7 °C | Very low | Medium | Very Harmful | D-icing |
| CHEMICAL BY TRUCK | Yes | Late | Short | Long | -40 °C | Very low | Medium | Less Harmful | A-icing D-icing |
| THERMAL HEATING | No | Immediately | Medium | Short | Depend on system power | High | Low | Harmless | A-icing D-icing |
| GRAPHITE ASPHALT PAVEMENT SYSTEM | No | Immediately | Short | Short | Depend on system power | Very High | High | Harmless | A-icing D-icing |
| HEATING BY ELECTRIC CABLES | No | Immediately | Long | Short | Depend on system power | Very High | High | Harmless | A-icing D-icing |

In this paper, FAST systems' technology, critical aspects of FAST and system components are analyzed. The main contribution of this is to put forward an instruction guide on determining and designing components of the FAST system. Although FAST systems have been evaluated from various visions, this paper will clear up important deficiencies in the critical aspects of FAST. Consequently, this study is also important for conveying the experience gained by the authors while FAST was implemented in Turkey to the other designers and researchers in terms of overcoming the difficulties encountered in design, material selection, and installation process. Various experiences and evaluations on FAST systems can be acquired with the FAST reports. Before arising an ice problem, system can solve the application of chemical liquid on roadways without any need for maintenance personnel. It is an inevitable fact that the development and determination of the system components will help to solve several problems encountered in the implementation of the system as well as increase the service life of the structures where the system is used and where there are high investment costs. However, the reports mentioned don't contain critical aspects for FAST, development of system hardware, and the system components technology and so this study will meet this deficit.

2. TECHNOLOGY AND CRITICAL ASPECTS OF FAST

FAST composes of interdisciplinary fields such as electronics, mechanics, chemistry, construction, communication, and data processing technologies. Also, the FAST design methodology requires focused attention while determining the components according to the conditions at the location where the system is installed, the weather conditions, and accident statistics. Therefore, there are many criteria while determining components.

The first phase of FAST installation is to determine where the system should be installed. To ensure future road safety, identification of previously existing traffic accident hotspots is necessary [14]. Criteria for installation FAST specifically on the bridge deck are listed below [15]. These are applicable for roads as well.

- Accident frequency;
- Accident rate;
- Accident loss (\$);
- Distance to bridge from maintenance yard;
- Travel time to bridge from maintenance yard;
- Bridge functional classification;
- Bridge Average Daily Traffic (ADT);
- Bridge truck percentage;
- Bridge span;
- Bridge alignment;
- Bridge surface type;
- Bridge approach width;
- Presence of water under the bridge;
- Number of days with min. temp. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Number of days with max. temp. $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

FAST system generally consists of components and subsystems introduced in Figure 1. The components commonly used in FAST projects are analyzed and the criteria while determining the components are outlined.

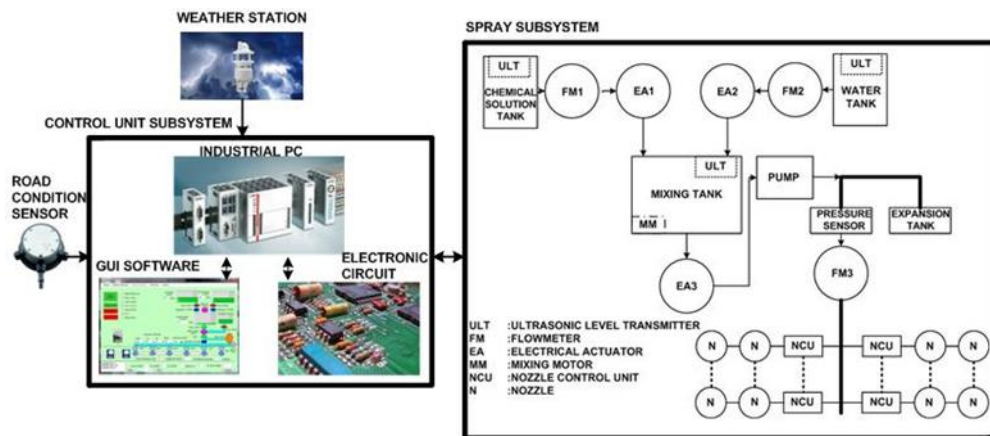


Figure 1. Components and subsystems of FAST

2.1. Road Condition Sensors

Measurement of road weather and surface condition are fundamental process while considering when and what kind of road maintenance is needed [16]. Road surface evaluation is the most important requirement for anti-icing and deicing. A road condition sensor is used for determining road conditions. It is important to warn drivers or maintenance staff against icing, black ice and slippery surface.

Road condition sensors may be passive or active in terms of determining road properties by a fixed sensor or heating and cooling with a Peltier element. The passive sensor that makes all measurements in one unit measures road surface temperature, temperatures below the surface, water film level, and road conditions (dry/damp/wet/ice or snow/residual salt/freezing). Passive sensors determine surface current freezing temperature with the salt content only. The active measuring process is implemented by measuring the energy released when the solution is melting. Active road condition sensor is generally used for different anti-icing chemical as NaCl, MgCl₂, and CaCl₂. This sensor determines a freezing temperature in a period and this process goes on as long as the road is wet and nearby the freezing point. If the active sensor is used, a passive road sensor should be used, too. Because the road condition is changed during cooling and heating and so the other parameters of the road are possibly changed while this process is implemented. New generation road condition sensors are developed as noninvasive and mobile sensors. Noninvasive sensors with optical principle measure road properties optically or spectroscopically different from the flush-mounted sensors. If there is water on the road, this changes wavelength and spectral characteristics.

This technology is preferred when the road reconstruction is repaired and the surface of the asphalt isn't appropriate for flush-mounted sensors. The other alternative, a mobile road sensor, is installed on the vehicle for detection of the road surface properties. It measures the friction coefficient and sends icing data to gritting vehicles and interface protocols. These sensors are generally used on snow removal and spreader vehicles.

- Critical aspects of road condition sensors are listed below:
 - Road condition sensor should measure
 - road surface and below surface temperature with high resolution such as <0.2 °C.
 - road surface conditions as dry, moisture, and wet.
 - water film thickness.
 - freezing temperature for different de-icing materials.
 - conductivity of road for ice percentage.
- Operating temperature should be selected with respect to the system installation place. However, it should generally be selected between -40 °C and 70 °C.
- Sampling rate should be smaller than 10 min and 1 min respectively for active and passive road condition sensors.
- Sensors should be flush-mounted for active and passive sensors and shouldn't create any protuberance on the road. Sensors should be installed outside wheel path with no vibration and water shouldn't accumulate on it.
- Noninvasive sensor's measurement surface should be free of hump and trough, road markings, etc.
- Noninvasive sensor should be tightened the bolts for supplying no vibration and keeping the measurement angle fixed.
- Sensors should have low power consumption.

2.2. Weather Station

The other great common factor of icing is weather parameters on roads. These are weather temperature, relative humidity, precipitation intensity, precipitation type, precipitation quantity, air pressure, wind direction, and wind speed. Therefore, measurement of these parameters is fatal and necessary for struggle against icing. Current FAST systems use RWIS or weather stations to get weather data [17]. It consists of intelligent transducers, digital interface circuits, sensors, Doppler radar, and ultrasonic sensors. Weather temperature and relative humidity are generally measured respectively with NTC and capacitive sensor. Air pressure data is obtained with MEMs capacitive sensor; wind direction and speed are measured with ultrasonic sensors or mechanically. Precipitation is measured with a Doppler radar or mechanically. This data is used for measuring the precipitation type and intensity by calculating the correlation between the quantity and speed. The measurement output data is delivered with special protocols, MODBUS, SDI-12, RS485, etc.

Critical aspects of the weather station are listed below:

- Weather station should measure
 - weather temperature with high resolution such as <0.2 °C.
 - humidity with high resolution such as $<0.5\%$ RH and scale with 0-100% RH.
 - wind speed with high resolution such as <0.5 m/s and higher range than 1 m/s to 50 m/s.
 - wind direction with high resolution such as <5 °.
 - precipitation type.
- Operating temp. should be selected in respect to system installation place but it is generally selected between -50 °C and 60 °C.
- Sampling rate should be smaller than 1 min.
- The installation place of the weather station must be free of trees and plants.
- It should be tightened the bolts for supply no vibration and to keep the measurement angle fixed.
- It should have low power consumption.

3. CONTROL UNIT SUBSYSTEM

Control Unit and Software take data from sensors, control mechanical hardware of the system and decide system outputs. The spray subsystem, sensors, power units for the whole system, etc. are controlled and monitored by the Control Unit subsystem.

There are many types of controllers used in FAST systems. Current FAST systems commonly use Industrial PC (IPC). It is a computer used especially for process control and in extreme environmental conditions such as too hot or cold weather, humidity, very dusty platform, power supply with big distortion or surges, vibration, etc. Except for operation environment conditions and modular I/O cards, it is similar to PC technology. It has CPU, RAM, flash memory card, Ethernet interfaces, USB interfaces, DVI-I interface fieldbus, serial interface, etc. The industrial PC accessories such as Analog I/O, Digital I/O, RS485, CAN cards, etc. can be connected via the multi-pin terminals.

The Control unit contains electronic circuits too. Connection and communication processes between the controller and electromechanical components are realized via electronic circuits. Communication, valve control, repeating data, motor controls, and fault detection are done with these circuits. The wiring that supplies electricity to the pump, solenoid, and RWIS station is particularly susceptible to corrosion. Under normal circumstances, the wiring should not come in contact with the deicing chemical. The FAST system must have a generator with enough power for all components.

Critical aspects of control unit and software are listed below:

- Control unit should have
 - operating temp. between -50°C and 60°C.
 - storage temp. between -60 °C and 70 °C.
 - real-time operation.
 - fast response time.
 - high data transmission rate.
 - low power consumption.
 - an EMI filter.
 - automatically reset function for an unexpected situation.
 - different communication protocols support and wired/wireless communication techniques.
 - property of compatible with expansion cards.
 - protection against dust, water, and chemical.
 - safety area for installation.

A software for FAST implements very duties such as data collection from the road condition sensor and weather station, other sensors, data processing, controlling valves, determining nozzles spray number, sequence, and duration, monitoring the conditions of the environmental factors and the condition of nozzles, programming automatic or manual spray prefer, etc. The software also includes a graphical user interface (GUI). GUI provides people to monitor and controls the parameters of the system through various communication ways.

- Software should be:
 - user-friendly.
 - easy adapted to system changes.
 - error-tolerant.
 - hierarchical user panel property.
 - compatible with different unit types.
 - logging property.
 - icing must be sensed correctly and should be predicted with high accuracy.

Figure 2 shows a flowchart of control system software on FAST system.

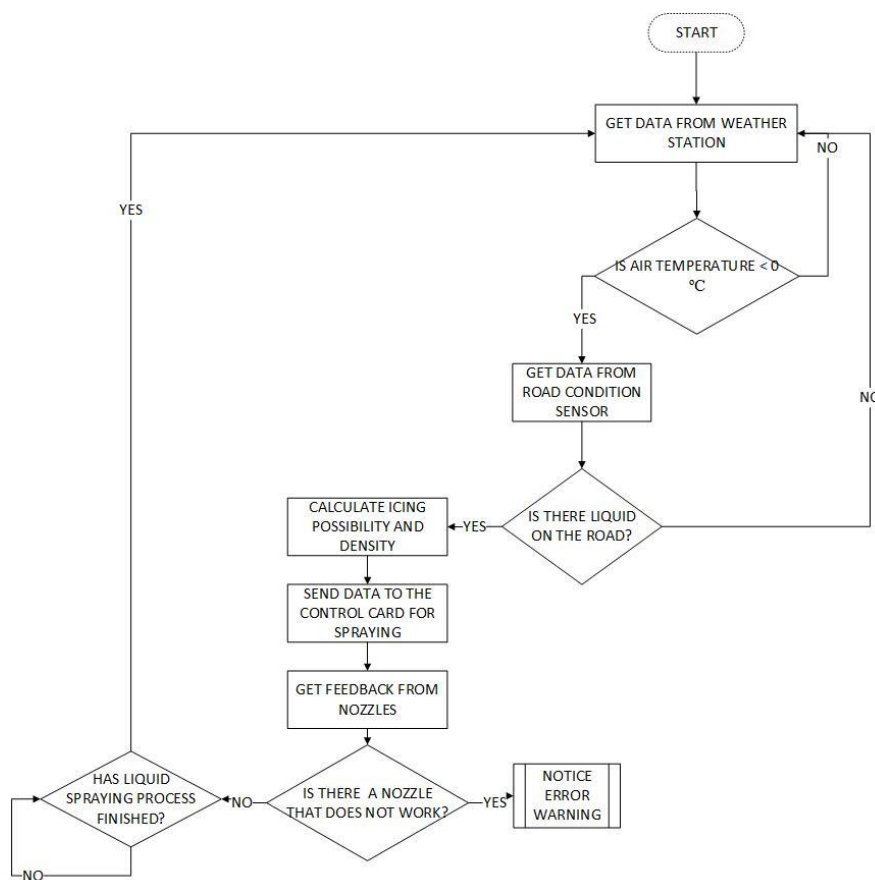


Figure 2. Flowchart of the control algorithm of the system

4. SPRAY SUBSYSTEM OF FAST

Spray subsystem is used to store and transfer anti-icing chemicals to the road. According to data from sensors, switches and relays on electronic circuits are triggered and the spray subsystem begins to operate. The spray subsystem consists of water and mixing tanks, ultrasonic level transmitter (ULT), anti-icing chemical, flow meters (FM), electrical actuator (EA), expansion tank with mixer motor, pumps, pressure sensor, valves, nozzle control units (NCU) and nozzles (N). The spray subsystem is shown as a block diagram in Figure 1. As mentioned before, the FAST system was installed in Turkey and the implemented spray subsystem is shown in Figure 3.

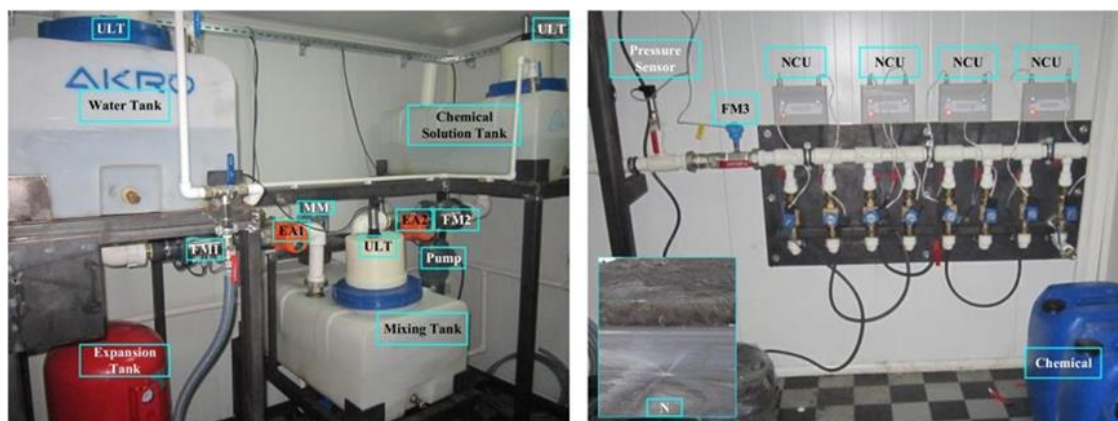


Figure 3. Implemented spray subsystem view

Water, anti-icing chemical, and mixing tanks of the FAST system should be manufactured from polyethylene material. These tanks shouldn't be reacted with chemical liquid placed in them. The tanks shouldn't leave particles and shouldn't be affected by sunlight or weather conditions. There are generally three polyethylene tanks in FAST systems. The first one is for anti-icing chemical. The second one is for water. The water is for arranging chemical solution anti-icing property according to the freezing point on the road. The third polythene tank is for mixing anti-icing chemicals and water and housing this solution. The other tank is an expansion tank. This tank manufactured from stainless steel is used for ensuring the continuity of the mixture in the pipes of the system with high pressure. This pressure is arranged by changing and balancing the membrane. Mixture tank may not be used for some applications. Instead, water and chemical are transferred to the expansion tank directly. If a mixing tank is used, a mixture motor must be used to prevent precipitation. Low capacity expansion tanks are generally used to fix endpoint pressure before nozzles in Nozzle Control Unit (NCU). The nozzles spray the mixture of water and chemical solution with this pressure. The number of nozzles, length of the system, and the number of average activation of the system per season should be taken into account while determining the size of tanks.

There are three flow meters in the system. A flow meter is used for measuring the volume flow rate of liquid that fills a closed pipeline and flows continuously in it. Turbine type is generally used for FAST applications. It should have low viscosity, anti-corrosion property, high accuracy, and high resolution. Ultrasonic type flow meter isn't preferred as this type must be calibrated for different liquids. The operating pressure and measurement capabilities of the flow meter should be determined according to the spray subsystem.

An electrical actuator or proportional valves are used to scale the amount of water and chemical. This mixture is transferred to the expansion tank directly. The amount of liquid scale is set generally according to the current. This current is 4–20 mA. These parts should have stainless material and fast response time.

An ultrasonic level transmitter is used for sensing the level of liquid by non-contact measurement. The sensor emits high-frequency acoustic waves that are reflected back to and detected by the emitting transducer. The transmitter is usually composed of an ultrasonic sensor, transducer, level controller, and computer interface. The output of the transmitter is DC voltage or 4-20 mA. There are generally three ultrasonic level transmitters in the system. These transmitters are used for determining the level of water, chemical, and mixture solution. Thus, critical levels for the liquids can be tracked.

The mixture solution is absorbed from the tanks by a pump. The pump should be made from titanium (corrosion and wear resistance), should have enough power for the system, and maintenance should be done regularly. The operating temperature should be selected appropriately for the system. The pressure sensor is used for measuring pressures of the expansion tank and pipes. This sensor should measure from 1 bar to 40 bars and should be suitable for operating in hard weather conditions. It must be stainless. The output signal can be selected as 4–20 mA or 0–10 V.

Solenoid valves control order and length of time each nozzle sprays. A solenoid valve is used for fluids. Electrical energy is converted to linear kinetic energy with a solenoid valve with the advantage of the magnetic effect of electric current. These valves are controlled with Nozzle Control Unit and used to transfer solution to spray nozzles. They must be stainless, have a fast response time, and have low power consumption. Piping should be high-pressure polyvinyl chloride piping. Piping is used from pump discharge to solenoid valves, and nylon tubing from the solenoid valves to the nozzle assemblies. Fluid carrying hose and electrical wiring are contained in galvanized steel pipe.

The nozzle control unit contains low capacity expansion tank and electronic devices for communication and control. The low capacity expansion tank should have the same properties as other expansion tank. Electronic devices should have long-range communication lengths. Also they should be selected appropriately for hard weather conditions.

Nozzles are used for spraying solutions to the road. They should be placed at a suitable distance whether mounted on pavement or on parapets. Spray nozzles differ according to the application places and FAST design. There are generally three types of nozzles as in-pavement flush-mounted, guardrail-mounted or parapet wall, and micro spray nozzles. In-pavement flush-mounted nozzle is preferred mostly. This nozzle disk is mounted a few millimeters below the pavement. Spray nozzles may be installed in the center of the lanes and so chemical solution may be covered on all lanes of traffic. It is the disadvantage of this type that

all traffic lanes are closed while installation or maintenance. The other flush-mounted type is installed near the shoulder of roadways. It isn't necessary to close all lanes for maintenance and installation but the nozzle top is covered with snow when the weather is heavy snow and snow plough vehicle rakes out snow sides of roadways. Guardrail-mounted or parapet wall installation is cheaper than flush-mounted because of its simple design and maintenance. These nozzles should spray stronger to cover all lanes. The closing possibility of nozzle because of snow plough vehicle is quite high. Micro spray nozzles are generally used in private areas such as airports and viaducts. They spread solution homogenously and installation on road is easy. Manufacturing material of spray nozzles should be resistant to damage and non-corrosive such as stainless steel. Nozzles should be removable for cleaning and maintenance. The number and pattern of nozzles are determined according to the required coverage as shown in the design drawings. Carrying solution with the wheels of vehicles should be taken into account while planning places of nozzles. The height of nozzles in pavement should be adjustable to some degree.

Anti-icing chemical lowers freezing point and this provides road ice to melt at lower temperatures, preventing the accumulation of slippery ice [18]. Chemical liquid that leaves the surface slightly moist will be enough for melting ice in many conditions. When selecting chemicals, their performance characteristics (e.g. effective temperature and ice melting capacity) along with their cost, application rates required for various road weather scenarios, and environmental risks (including those to metals and concrete) should be considered. Anti-icing liquid shouldn't have crystals and foreign objects which may block fine spray nozzles. The anti-icing chemical is determined according to the weather and road temperature where the system is installed. Cost, applicability, environmental impact, and corrosive effect are the most important criteria for choosing a chemical liquid. Chemicals may affect barriers, vehicles, signs, concrete, and asphalt [19]. Besides anti-icing chemical determines the properties of tanks, pipes, and all spray subsystem. To dissolve a certain amount of ice at a specified temperature needs a certain amount of deicing material. The amount should be determined carefully. In case of an insufficient amount of salt for road surface covered with ice, the layer of ice does not always melt away. When an excessive amount is spread over, entire ice melts, but, some part of deicing is wasted unnecessarily, which is an economic loss. FAST systems arrange the optimum amount of chemicals and eliminate these disadvantages. Determining factors of chemicals are speed, the required quantity of material, and duration of melting action. Environmental considerations are also important [20]. Truschke et al. [21] investigated highly concentrated deicer solutions applied through bridge deck deicing and anti-icing systems disproportionately contributed to the deterioration of portland cement concrete bridge decks and adjacent concrete approach slabs in Colorado and mitigation strategies employed by Colorado DOT addressed the problem. The most used anti-icing chemicals for road surfaces are Calcium Chloride (CaCl_2), Sodium Chloride (NaCl), Magnesium Chloride (MgCl_2), Calcium Magnesium Acetate (CMA) and Potassium Acetate (KAc). Chlorides based chemicals have the most corrosive effects on carbon steel [22]. Acetates are more environment friendly but they are more expensive than chlorides. During the process of melting snow or ice, additional water is produced and the concentration of the deicer is reduced, which may cause the solution to re-freeze. Xie and the others report a comparative study of field cores taken from two select Nebraska concrete decks and from two select Utah concrete decks. This case study sheds some light on this complex issue of concrete durability and raises awareness of the risk of using KAc deicers on concrete structures and components [23].

Critical aspects of the spray subsystem are listed below:

- Mixture amount sprayed from nozzles should be measured and adjusted.
- Spray subsystem should have fault tolerance and fault detection.
- Spray subsystem should be modular.
- Subsystem components should be controlled separately and deactivated.
- Subsystem components should be placed in a safe place.
- Chemical and water amounts in tanks should be monitored.
- Nozzles and sensor's operating temperatures should be appropriate to environmental conditions and placed regularly.
- Subsystem components should be selected according to the chemical used.
- Subsystem should contain a control room and storage room for tanks.
- Property of blocking chemical liquid precipitation should be added.
- All of the components should be selected as corrosion-resistant property.

- Although the system operates automatically, subsystem units should be intervened as manually for unforeseen circumstances.

5. CONCLUSIONS

FAST is widely used to prevent accidents caused by winter conditions. Based on the data obtained as a result of the literature review, the benefit-cost ratio higher than 1 in all applications put forth the superiority of FAST and become more and more widespread day by day. In this study, FAST is compared with other struggling methods. In addition, components constituting FAST are presented in an integrated approach. It has been observed that the usage amounts of chemicals used in art structures such as bridges, viaducts and airports will be optimized with this approach and so the service life of building elements is increased by decreasing corrosion. It also helps to keep the skid resistance value in a safe range by predicting weather conditions.

Benefit-cost ratio of FAST is directly proportional to the critical aspects of the components used in the design. In this study, these critical aspects are presented. Also, the factors that should be considered in selecting each component of FAST are given in detail. FAST is an interdisciplinary application and its design includes many scientific fields.

Not only material selection, but also criteria for control unit and software are put forward. There is no study on the determination of the FAST components taking into account the integrity of the system. Therefore, this study is an important source for filling this deficiency in the literature.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Asst. Prof. KÜRŞAT YILDIZ from Gazi University, Technology Faculty, Civil Engineering Department.

REFERENCES

- [1] Yıldız, K. (2018). Şehir içi asfalt kaplamaların kayma potansiyelinin değerlendirilmesi - bir durum çalışması. *Journal of Polytechnic*, 21(2), 513-518. doi: 10.2339/politeknik.407259.
- [2] Xiao, J., Kulakowski, B. T., & Ei-Gindy, M. (2000). Prediction of risk of wet-pavement accidents: fuzzy logic model. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1717 (1), 28-36. doi: 10.3141/1717-05.
- [3] Pan, P., Wu, S., Xiao, F., Pang, L., & Xiao, Y. (2015). Conductive asphalt concrete: A review on structure design, performance, and practical applications. *Journal of Intelligent Material Systems*, 26(7), 755-769. doi: 10.1177/1045389X14530594.
- [4] Pisano, P. A. Goodwin, L.C., & Rossetti, M.A. (2008). U.S. highway crashes in adverse road weather conditions, the 24th Conference on IIPS ,1-8.
- [5] Kabaoğlu, H., Uçar, E., & Duran, F. (2021). Buzlanma tahmini yapan mobil uygulama geliştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, 24(4), 1543-1555. doi: 10.2339/politeknik.735408.
- [6] Ünlü, D., & Hilmioglu, N. D. (2017). Uçaklarda buzlanma ve buzlanmayı önleyecek yöntemler. *Journal of Sustainable Aviation Researches*, 2(2), 75-80.
- [7] Ye, Z., Wu, J., Ferradi, N. E., & Shi, X. (2013) Anti-icing for key highway locations: fixed automated spray technology. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(1), 11-18. doi: 10.1139/cjce-2012-0226.
- [8] Xu, S., Zhou, Z., Feng, L., Cui, N., & Xie, N. (2021) Durability of pavement materials with exposure to various anti-icing strategies. *Processes*, 9(2), 291-316. doi: 10.3390/pr9020291.

- [9] Veneziano, D., Muthumani, A., & Shi, X. (2015). Safety effects of fixed automated spray technology systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2482(1), 102-109. doi: 10.3141/2482-13.
- [10] Akin, M., Fay, L., & Shi, X. (2020). Friction and snow-pavement bond after salting and plowing permeable friction surfaces, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2674(11), 794-805. doi: 10.1177/0361198120949250.
- [11] Decker, R. (1998). Automated bridge deck anti-and deicing system, in *Idea Project Final Report*, University of Utah, Salt Lake City.
- [12] Keranen P. F. (1998). Automated bridge deicers for increased safety and decreased salt use in Minnesota, the Xth PIARC International Winter Road Congress.
- [13] Ratkevičius, T., & Laurinavičius, A. (2017). Assessment model of levels for winter road maintenance. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 12(2), 127-134.
- [14] Butt, A., Ahmad, S. S., Shabbir, R., & Erum, S. (2017). GIS based surveillance of road traffic accidents (RTA) risk for Rawalpindi city: a geo-statistical approach. *Kuwait Journal of Science*, 44(4), 129-134.
- [15] Khattak, A. J., Pesti, G., Kannan, V., & McCoy, P.T. (2002) Guidelines for prioritizing bridge deck anti-icing system installations, in "NDOR Research Project, Nebraska Department of Transportatio, Lincoln.
- [16] Hinkka, V., Pilli-Sihvola, E., Mantsinen, H., Leviäkangas, P., Aapaoja, A., & Hautala, R. (2016). Integrated winter road maintenance management — New directions for cold regions research. *Cold Regions Science and Technology*, 121, 108-117.
- [17] Duran, F., & Teke, M. (2019). Akıllı Yol durum sensörü tasarımı. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 396-401. doi: 10.29137/umagd.510777.
- [18] Seferoğlu, A., Seferoğlu, M., & Akpınar, M. (2015). Karayolu ve havayolu kaplamalarında kullanılan kar ve buzla mücadele yöntemlerinin mali analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 3(1), 407-416.
- [19] Keleştemur, O., & Yıldız S. (2006). Effect of various NaCl concentration on corrosion of steel in concrete produced by addition of styrofoam. *Gazi University Journal of Science*, 19(3), 163-172.
- [20] Ružinskas, A., Bulevičius, M., & Sivilevičius, H. (2016). Laboratory investigation and efficiency of deicing materials used in road maintenance. *Transport*, 31(2), 147-155. doi: 10.3846/16484142.2016.119078.
- [21] Truschke, C., Peterson, K., Van Dam, T., Peshkin, D., Dedene, C., & Dedios, R. (2011) Investigation of portland cement concrete exposed to automated deicing solutions on Colorado's Bridge decks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2220(1) 1-11. doi: 10.3141/2220-01.
- [22] Asghshahrn, M. S., & Rahai, A. (2018). Seismic assessment of reinforced concrete bridge under chloride-induced corrosion. *International Journal of Civil Engineering*, 16(6), 681-693. doi: 10.1007/s40999-017-0146-2.
- [23] Xie, A. M. N., Dang, Y., & Shi, X. (2015). Deicer Impacts on concrete bridge decks: a comparative study of field cores from Potassium Acetate and Sodium Chloride environments. *Innovative Materials and Design for Sustainable Transportation Infrastructure*, 42-57. doi: 10.1061/9780784479278.005

Modelling of Cutting Forces with End Mills

B. Sercan BAYRAM^{1,*}  İhsan KORKUT¹ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 21.03.2022
Revision: 14.06.2022
Accepted: 13.09.2022

Highlights

- Mechanistic model.
- Optimization.
- Calculation of special shear coefficients.

Keywords

Cutting Dynamics
Force Model
Mechanistic Model

In this study, a mechanistic force prediction model using optimized force data for end milling was presented.

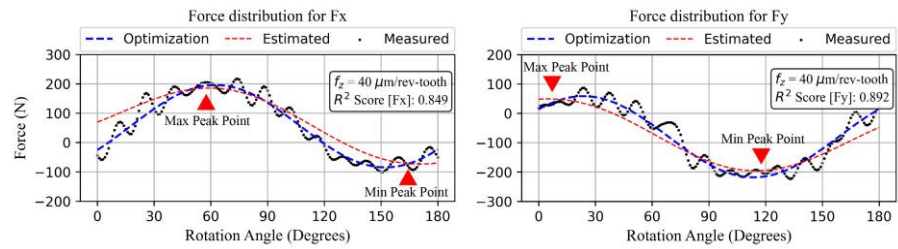


Figure A. Comparison of experimental results and estimation results.

Purpose: Many parameters such as the clamping size of the cutting tool to the spindle, variable chip shape and tool helix angle have a significant effect on cutting stability. These effects can cause to unsuccessful results for experimentally calculated specific shear coefficients. In this study, a force estimation model developed with the mechanistic method in which noisy force data is optimized is presented.

Theory and Methods: The presented method requires a combination of mathematical and experimental methods. A series of triple experiments were performed to calculate the specific cut-off coefficients required. Details about the experimental setup are given under the title of materials and methods. The measurement data were optimized and the special cutting coefficients were calculated with the mathematical method given in the study. Force estimates were made with a mechanical model. The estimation results were evaluated by comparing with the experimental measurement results.

Results: Unstable states cause noise in the measurement data. Noises in the measurement data should be minimized in order to make an accurate estimation of cutting force. The data are optimized for the minimization of the noises using the mathematical method known as Fourier approximation. The results converged to real data very fast and ideal force functions were obtained. Special cutting coefficients are calculated with these functions. The force estimation model was established and cutting force estimations were made in the Fx and Fy directions for a milling operation at last.

Conclusion: In this study, a mechanistic force estimation model was developed by using optimized force data for the estimation of cutting forces. Calibration experiments were carried out for the pair of cutting tool and workpiece material. The data obtained from the experiment were optimized with the mathematical method given in the study with detail and the special cutting coefficients were calculated after the optimization. Force estimates were made with mechanistic method. An estimate was made for the cutting forces in the Fx and Fy directions, and this estimate was evaluated by comparing with the experimental measurement results.



Modelling of Cutting Forces with End Mills

B. Sercan BAYRAM^{1,*} İhsan KORKUT²

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

Milling is an important production method that is frequently used in many areas. It is important to understand the dynamics of the milling process to improve the quality and production performance of the parts. The cutting tools used in the milling operation have many different geometries. The geometry directly affects the occurred forces during the cutting process. Therefore, the occurred forces are essential parameters for tool design. In this study, a mechanistic model was developed using optimized data to predict shear forces. The measured force signals were optimized by the Fourier approximation method. For the calibration of the cutting coefficients, seven different feed rates were determined as parameters by preliminary tests. Three repetitive calibration experiments were performed at constant cutting speed and axial depth with each feed rate. In order to have identical test conditions, the samples were machined to the same dimensions and their surfaces were ground. AISI 4140 tempered steel was preferred for samples. Milling experiments were carried out with 38° helix angled end mills made of AlCrN coated Tungsten carbide (WC) alloy at a fixed axial depth of 500 µm. The spindle speed was at 3350 rpm, and the sampling rate was at 10 kHz. The force estimations from the developed model were compared with the experimental results and it was seen that the estimations were following the experimental results in accuracy between 80% and 90%.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 21.03.2022
Düzeltilme: 14.06.2022
Kabul: 13.09.2022

Keywords

Cutting Dynamics
Force Model
Mechanistic Model

Anahtar Kelimeler

Kesme Dinamiği
Kuvvet Modeli
Mekanistik Model

Parmak Frezelerde Kesme Kuvvetlerinin Modellenmesi

Öz

Bir üretim yöntemli olan frezeleme, üretimin gerçekleştirildiği birçok alanda sıklıkla kullanılan önemli bir metottür. Bu yöntem ile üretilen parçaların kalitesini ve üretim performansını iyileştirmek için yapılan çalışmalarda, frezeleme dinamiğinin anlaşılması önemlidir. Frezeleme operasyonunda kullanılan kesici takımlar birçok farklı geometriye sahiptir ve kesici geometrisi kesme işlemi sırasında oluşan kuvvetleri doğrudan etkiler. Bu yüzden, kesme sırasında oluşan kuvvetler takım tasarımı için temel parametrelerdendir. Bu çalışmada, kesme kuvvetlerini tahmin etmek için, optimize edilen verilerin kullanıldığı mekanistik bir model geliştirilmiştir. Ölçümü yapılan kuvvet sinyalleri, Fourier yaklaşım yöntemi ile optimize edilmiştir. Kesme katsayılarının kalibrasyonu için, ön frezeleme deneyleriyle yedi farklı ilerleme hızı parametre olarak belirlenmiştir. Belirlenen her bir ilerleme parametresi ile sabit kesme hızı ve eksenel derinlikte üç tekrarlı kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Deney koşullarının özdeş olabilmesi için numunelerin boyutları aynı boyutlara işlenmiş ve yüzeyleri taşlanmıştır. İş parçası olarak sıklıkla kullanılan mühendislik malzemesi AISI 4140 ıslah çeliği tercih edilmiştir. Frezeleme deneyleri, 3350 dev/dk iş mili hızı ve 10 kHz örnekleme aralığında, AlCrN kaplı Tungsten karbür(WC) alaşımından üretilmiş 38° helis açılı parmak frezeler ile 500 µm sabit eksenel derinlikte gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen model ile yapılan kuvvet tahminleri deneysel ölçümlerle karşılaştırılmış ve tahminlerin %80-90 doğruluk aralığında deneysel verilerle uyum gösterdiği görülmüştür.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

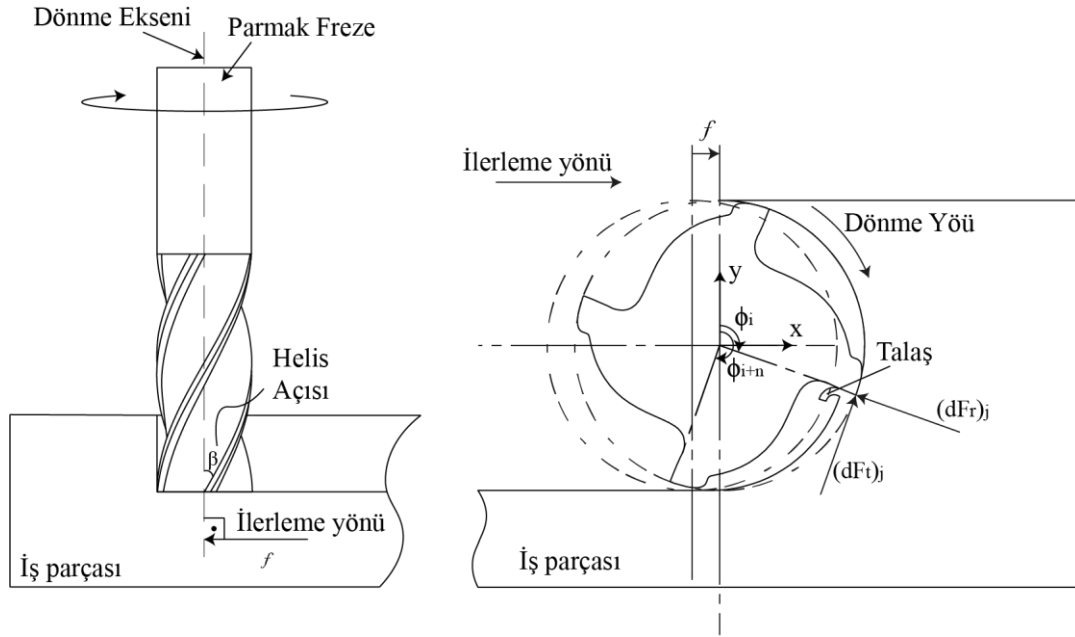
Birbirleri ile etkileşim içerisinde çalışan makine parçaları için yüzey pürüzlüğü, parçaların ömürleri ve çalışma veriminde önemli etkiye sahiptir. Kesme işlemindeki performans, bitmiş parçaların yüzey

kalitesinde önemli bir role sahiptir. Bu nedenle, işleme koşullarının iyileştirilmesi kesme işleminin kararlılığı için çok önemlidir. Kesme performansı, işlenen malzeme, kesici takım geometrisi, kesme parametreleri ve soğutma tipi gibi birçok parametreye bağlı olarak değişir. Bu konuda çalışmalar yapan araştırmacılar, yüzey pürüzlülük değerlerini dikkate alarak Taguchi yöntemiyle optimum kesme parametrelerini araştırmış ve bu koşullar altında yapılan kesme işlemleri için yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir [1], [2]. Başka bir çalışmada, E. Kuram ve B. Ozelik mikro frezeleme sırasında kesme parametreleri ve kuvvet bileşenleri (F_x ve F_y)'nin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanarak incelemiştir [3]. Yapılan çalışmalarda, kesme performansının yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkileri vurgulanmıştır. Kararlı kesme koşulları için bir başka önemli faktörde kesici takım geometrisidir. Özellikle yüksek performanslarda kesme işlemleri için uygun geometriye sahip kesici takımlar gerekir. Takım tasarımında, kesme sürecinde meydana gelen kesme kuvvetleri ve aşınmaya karşı direncin idealize edilmesi temel prensiptir. İyi bir takım tasarımı, kesme dinamiğinin araştırılması ve takıma etkiyen tüm kuvvetlerin bilinmesini gerektirir [4]. Kesme işlemi gerçekleşmeden kuvvetlerin tahmin edilmesi, işlenecek parçanın geometrik hatalarının ve işlem için harcanacak gücün önceden tahmin edilmesini sağlar. Bu durum, üretimde maliyet hesapları, işlenecek parçanın geometrik tolerans aralıkları gibi birçok parametrenin mühendisler tarafından hesaplanmasını kolaylaştırır. Kesme mekaniğinde tornalama, frezeleme ve delme gibi kesme operasyonlarının kinematığı birbirlerinden farklı olsa da temelde aynı mekanik prensipleri içermektedirler. Kesme mekaniği ile ilgili birçok farklı çalışmalar yapılmıştır [5], [6]. Bu çalışmalar arasında en temel varsayım ortogonal (dik) ve oblik (eğik) kesme modelleridir. Gerçekte çoğu kesme işlemleri üç boyutlu ve karmaşık geometrilere sahip olmasına rağmen kesme mekaniğini açıklayabilmek için çoğunlukla iki boyutlu ortogonal kesme modeli kullanılmaktadır. Ortogonal kesme geometrisinde, takım kesici kenarı ile malzemenin hareket yönü arasındaki açı birbirine diktir. Kompleks geometrilere sahip üç boyutlu eğik kesme mekaniği ise ortogonal kesme modeline kinematik ve geometrik dönüşümler uygulanarak değerlendirilmektedir. Talaş oluşumu, kesicinin belli bir yanal genişliği ve aksel derinliğine bağlıdır. Ortogonal kesmede, kesme işleminin takım kesici kenarı boyunca aynı olduğu kabul edilir. Bu kabulde, yönleri kesme hızı (V) yönüne paralel ve dik yönde olan, teğetsel (*esas kesme kuvveti* F_t) ve pasif kuvvet (*ilerleme kuvveti* F_f) olarak adlandırılan kuvvetler tanımlıdır. Eğik kesme modelinde ise, kesici kenar eğim açısından kaynaklanan kesme hızı yönünde ve normal doğrultusunda olmayan radyal yönde bir kuvvet (F_r) daha oluştuğu varsayılır. Takımın kesici kenarının iş parçasına temas ettiği ve parçadan malzeme kaldırdığı bölge birincil bölge olarak adlandırılır. Oluşan talaş, deformasyona uğrayarak ikincil bölge olarak bilinen takım talaş yüzeyi üzerinden akar. Kesicinin serbest yüzeyinin kesilmiş iş parçasına sürtüdüğü yüzey ise üçüncül bölge şeklinde ifade edilir [7]. Merchant [8] tarafından geliştirilen dik kesme modelinde, bu çalışmada olduğu gibi kesme hızı doğrultuyla ϕ kadar açıya sahip ve kalınlığı olmayan bir kesme düzlemi kabulü benimsenmiştir. Palmer ve Oxley [9] gibi araştırmacılar, kesme düzleminin belirli bir hacminin olduğu ilkesiyle modellerini geliştirmişlerdir. Frezeleme için kuvvet tahmini ile ilgili ortaya konulan modeller, ortogonal kesme mekaniği ile ilgili yapılan çalışmalardan sonra ortaya çıkmıştır [10]. Bu çalışmalar, Martellotti tarafından frezeleme operasyonu üzerine yapılan araştırmalara kadar dayanmaktadır [11]. Koenigsberger ve Sabberwal mekanistik model olarak bilinen çalışmalarında, kuvvet tahmini için deneysel ölçümlere dayanan üstel kesme katsayılarını kullanmışlardır [12]. Çalışmalarda kuvvet tahmini için yapılan hesaplamalar birbirlerine benzerlik göstermesine karşın kesme katsayılarının belirlenmesi için yapılan yaklaşımlar farklılık göstermektedir. Mekanistik yöntemde kesme katsayıları (K_t , K_r , K_a) her kesici ve iş parçası için deneysel olarak belirlenir [13], [14]. Elde edilen kesme katsayısı (K_t) ile talaş alanı çarpılmasıyla anlık kesme kuvveti (F_t) hesaplanır. Bu yöntem birçok araştırmacı tarafından benimsenmiş ve çalışmalarda sıklıkla kullanılmıştır [15]–[19]. Sonuç olarak mekanistik yöntem, kesme kuvvetleri, kesme katsayıları ve talaş yüzey alanı değişkenlerine bağlı doğrusal ilişki içeren bir fonksiyon şeklinde açıklanabilir [20]. Bu çalışmada, kesme katsayıları kuvvet verileri optimize edilerek hesaplanmış ve mekanistik bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile yapılan kuvvet tahminleri, deneysel ölçümlerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Frezeleme Kesme Kuvvet Modeli

Parmak freze kesici kenarı, iş parçasına dalması sırasında oluşan darbeyi sönmülemek için helisel şekilde tasarlanır. Helis açılı parmak freze kesme kuvveti tahmininde kullanılan modelde deneysel olarak elde edilen kuvvet katsayılarından faydalanılır. Frezeleme operasyonu, iş parçasına göre belirli bir ilerleme hızında doğrusal bağlı harekete sahip, kendi eksenini etrafında dairesel olarak dönen kesici takımın iş parçasından malzeme kaldırması işlemidir. Esas kesme kuvveti, takım kesici kenarlarının dönen dairesel hareket ile iş parçasından malzeme kaldırması sırasında oluşan kesme kuvvetlerinden kaynaklanır. Frezeleme esnasındaki düz uçlu parmak freze ve kesme kuvvetleri Şekil 1’de gösterilmiştir.

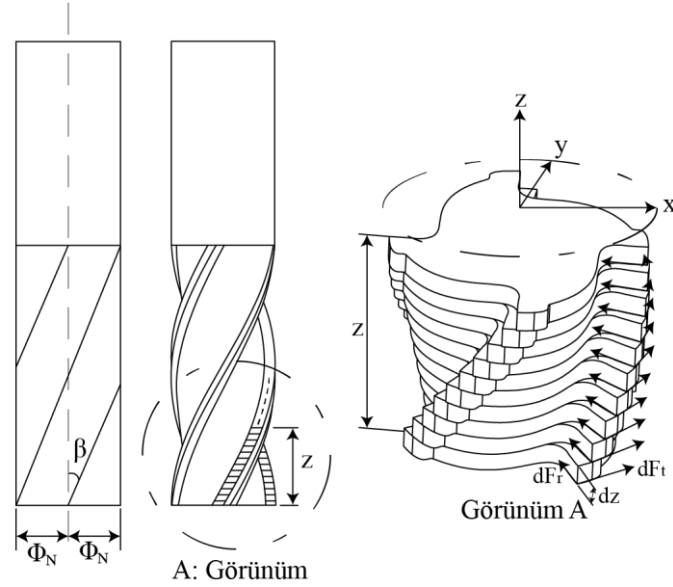


Şekil 1. Parmak freze ve iş parçası geometrisi.

Burada kesici takımın dönme eksenini iş parçası ile takım arasındaki bağlı hareketin doğrultusuna diktir. Çapı D ile belirtilen parmak freze kesici kenarları β helis açısına sahip olup uç radyüsleri sıfırdır. Helis açısı β sıfırdan büyük olduğu değerlerde, kesici uç noktasında alınan bir nokta aksenal Δz derinliğindeki noktadan daha geride kalacaktır. Bu durum gecikme açısı (ψ) olarak tanımlanır. Modelde kesme kuvvetlerinin yönlerini tanımlamak için orijin noktası kesici takımın uç alın yüzeyinin merkezi olan x,y koordinat sistemi tanımlanmıştır. Tanımlanan koordinat sisteminin z eksenini, takım ekseninde olup yukarı yönlüdür. Modelde kuvvetleri hesaplamak için kesme kuvvetlerinin sadece takımın kesme bölgesinde olduğu göz önüne alınmalıdır. Ayrıca taranan açı aralığına ve kesme ağız sayısına göre birden fazla kesici ağızın kesme bölgesinde bulunabileceği hesaba katılmalıdır. Kesici uç sayısı N olan parmak frezenin adım açısı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\phi_N = \frac{2\pi}{N} \quad (1)$$

Talaş içerisinde bulunan kesici kenar boyunca kesilen talaş kalınlığı, gecikme açısından (ψ) kaynaklı olarak aksenal doğrultuda her noktada farklı olacaktır. Bu sebeple, kesici kenara etki eden kesme kuvvetleri de her noktada farklı olacaktır. Bunun için kesici takım z eksenini boyunca dz yüksekliğe sahip diferansiyel elemanlara bölünür (Şekil 2).



Şekil 2. Diferansiyel kalınlıklara bölünmüş parmak freze geometrisi.

Gecikme açısından dolayı her bir disk elemanında kesme yapan kenarların açısal pozisyonu farklıdır ve her bir disk elemanı için yeniden hesaplanmalıdır. Açısal konumu farklı olan kesici kenarların talaş yükü farklıdır. Sonuç olarak her bir disk elemanına etki eden kesme kuvvetleri de farklı olur. N sayıda kesici kenara sahip parmak freze için, referans kesici kenarın konum açısı $\Phi(i,j,k)$ ise i'inci kesici kenar için k eksenel derinlikteki j'inci disk elemanının açısal konumu *Denklem (2)*'de gösterildiği gibi ifade edilebilir:

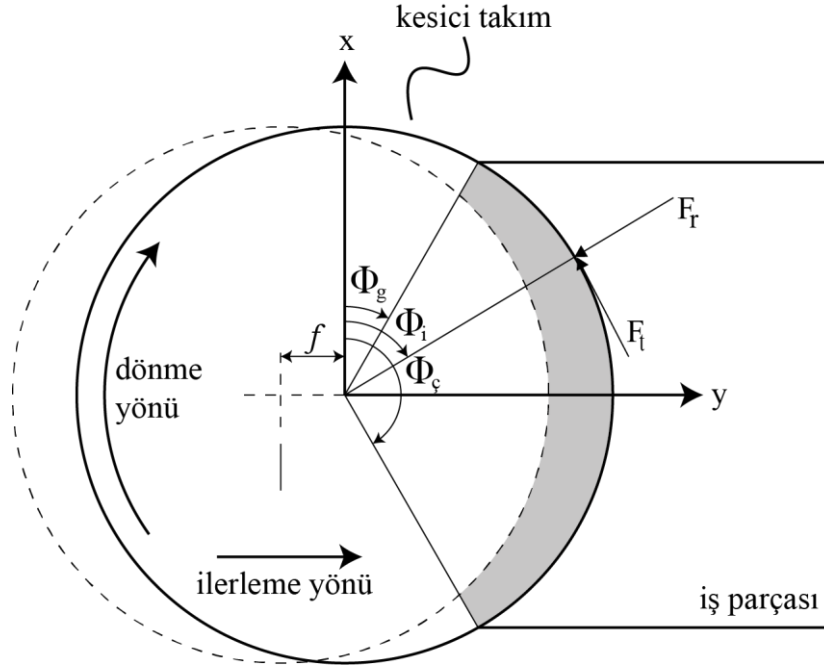
$$\phi(i, j, k) = \phi + \sum_{n=0}^{i-1} \phi_N - \psi_{\beta}(j, k) \quad (2)$$

Burada β helis açısı olup, gecikme açısı (ψ) *Denklem (3)*'teki gibi hesaplanır:

$$\psi_{\beta}(j, k) = \frac{2 \tan \beta}{D} \sum_{n=0}^j \Delta z(k) \quad (3)$$

Kesme işlemi sırasında anlık talaş kalınlığı zamanla değişen dönme açısına ve ilerlemeye bağlı olarak periyodik bir şekilde değişir (*Şekil 3*). Talaş kalınlığı değişimi *Denklem (4)*'de verildiği gibi hesaplanır:

$$t_{i,j}(\phi, k) = f \sin \phi_{i,j}(k) \quad (4)$$



Şekil 3. Kesici kenarın izlediği yola bağlı olarak oluşan talaş kalınlığı.

Kesme yapan dz kalınlıktaki disk elemanlarının kesici kenarına etki eden kuvvetler *Denklem (5)*, *Denklem (6)* ve *Denklem (7)*'de verildiği gibi hesaplanabilir:

$$dF_t^{i,j}(\phi, k) = [K_{te} + K_{tc}t_{i,j}(\phi, k)] dz \quad (5)$$

$$dF_r^{i,j}(\phi, k) = [K_{re} + K_{rc}t_{i,j}(\phi, k)] dz \quad (6)$$

$$dF_a^{i,j}(\phi, k) = [K_{ae} + K_{ac}t_{i,j}(\phi, k)] dz \quad (7)$$

*Şekil 2'*de gösterilen teğetsel (F_t) ve radyal (F_r) kuvvetlerin doğrultusu, sırasıyla kesme yönüne ters ve takım merkezi yönündedir. Bu kuvvetlerin yönleri, modelde tanımlanan eksen takımına göre trigonometrik fonksiyonlarla *Denklem (8)*'de gösterildiği gibi dönüştürülebilir:

$$\begin{bmatrix} dF_x^j(\theta, k) \\ dF_y^j(\theta, k) \\ dF_z^j(\theta, k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_j(k) & -\sin \theta_j(k) & 0 \\ \sin \theta_j(k) & -\cos \theta_j(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t^{i,j}(\theta, k) \\ dF_r^{i,j}(\theta, k) \\ dF_a^{i,j}(\theta, k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Eksenel doğrultuda, diferansiyel kalınlıklara bölünmüş disk elemanlarının kesici kenarlarındaki kuvvetler, *Denklem(4)*, *Denklem (5)*, *Denklem (6)* ve *Denklem (7)*, *Denklem (8)*'de yerlerine konulmasıyla hesaplanabilir:

$$\left. \begin{aligned} \begin{Bmatrix} dF_x^j(\theta, k) \\ dF_y^j(\theta, k) \\ dF_z^j(\theta, k) \end{Bmatrix} &= \frac{f}{2} \begin{bmatrix} -\sin 2\phi_j(k) & -1 + \cos 2\phi_j(k) & 0 \\ 1 - \cos 2\phi_j(k) & -\sin 2\phi_j(k) & 0 \\ 0 & 0 & 2\sin \phi_j(k) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_{tc} \\ K_{rc} \\ K_{ac} \end{Bmatrix} dz + \begin{bmatrix} \cos \phi_j(k) & -\sin \phi_j(k) & 0 \\ \sin \phi_j(k) & -\cos \phi_j(k) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_{te} \\ K_{re} \\ K_{ae} \end{Bmatrix} dz \\ \{dF_s\} &= \left[\frac{f}{2} [M_{1,j}] \{K_{qc}\} + [M_{2,j}] \{K_{qe}\} \right] dz \quad s=x,y,z, \quad q=t,r,a \end{aligned} \right\} (9)$$

Diferansiyel kesme kuvvetleri k aksel derinliği boyunca entegre edilir ve toplam kesme kuvveti *Denklem (10)*'da verildiği gibi hesaplanabilir:

$$F_s(\theta, k_{1,2}) = \int_{k_1}^{k_2} \left[\frac{f}{2} [M_{1,j}] \{K_{qc}\} + [M_{2,j}] \{K_{qe}\} \right] dz \quad s=x,y,z, \quad q=t,r,a \quad (10)$$

Model uygulanırken, kesme bölgesinde birden fazla kesici kenarın bulunabileceğine ve kuvvetlerin sadece bu bölge içerisinde oluştuğuna dikkat edilmelidir:

$$\phi_g \leq \phi \leq \phi_\zeta$$

Bu ifadeye verilen ϕ_g ve ϕ_ζ sırasıyla takımın kesici kenarlarının kesme bölgesine giriş ve çıkış açılarıdır. Kesme bölgesinde birden fazla kesici kenarın bulunması durumunu hesaplamak için *Denklem (1)*'de verilen adım açısı ile taranan açı ($\phi_t = \phi_\zeta - \phi_g$) karşılaştırılır. Taranan açı, adım açısından büyük ise kesme bölgesinde birden fazla kesici kenarın eş zamanlı kesme yaptığı anlamına gelir. Anlık kuvvet hesaplamalarında, kesme bölgesinde bulunan tüm kesici kenarların etkileri dikkate alınmalıdır.

2.2. Kesme Katsayılarının Kalibrasyonu

Kesme kuvveti katsayılarının mekanistik yöntemle belirlenmesi esası, anlık kesme kuvvetleri değerlerinin, anlık talaş hacmi ile ilişkilendirilmesine dayalıdır [21]. Esas kuvvet, birincil kesme bölgesinde bulunan kesme düzlemi ve kesici kenar yan yüzeyinin neden olduğu kuvvetler olmak üzere ikiye ayrılır. *Denklem (5-7)*'de verilen K_{tc} , K_{rc} ve K_{ac} katsayıları sırasıyla, teğetsel, radyal ve aksel kesme katsayıları olarak adlandırılır. Aynı denklemde yer alan K_{te} , K_{re} , ve K_{ae} katsayıları ise sırasıyla teğetsel, radyal ve aksel olmak üzere sürtünmeden kaynaklanan kenar kuvveti katsayılarıdır. Kesme kuvveti katsayılarının hızlı bir şekilde belirlenmesi mekanistik olarak yapılabilir [7]. Sabit kesme hızı ve kesme derinliği şartlarında, farklı ilerleme hızları ile dizi frezeleme deneyleri yapılır ve kesicinin bir kesme periyodu boyunca ortalama kuvveti ölçülür. Ölçülen ortalama kuvvetler analitik sonuçlar ile eşitlendiğinde kesme kuvveti katsayıları belirlenmiş olur. Kesici takımın bir periyodu boyunca ortalama kesme kuvveti *Denklem (11)*'de verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\bar{F}_s(\phi_{g,\zeta}, k_{1,2}) = \frac{1}{\phi_N} \int_{\phi_g}^{\phi_\zeta} F_s(\phi, k_{1,2}) d\phi \quad (11)$$

Kuvvetlerin sadece kesme bölgesinde oluştuğuna dikkat edilerek takımın bir kesme periyodu boyunca entegre edilirse:

$$\bar{F}_s(\phi_{g,\varphi}, k_{1,2}) = \frac{1}{\phi_N} \int_{\phi_g}^{\phi_c} \int_{k_1}^{k_2} \left[\frac{f}{2} [M_{1,j}] \{K_{qc}\} + [M_{2,j}] \{K_{qe}\} \right] dz d\phi \quad s=x,y,z, q=t,r,a \quad (12)$$

Entegrasyon işlemi giriş ve çıkış açıları sırasıyla, $\Phi_g=0$ ve $\Phi_c=\pi$ açılarıyla yapıldığında, kesici takımın bir periyodundaki ortalama kuvvet *Denklem (13)*'deki gibi basitleşir:

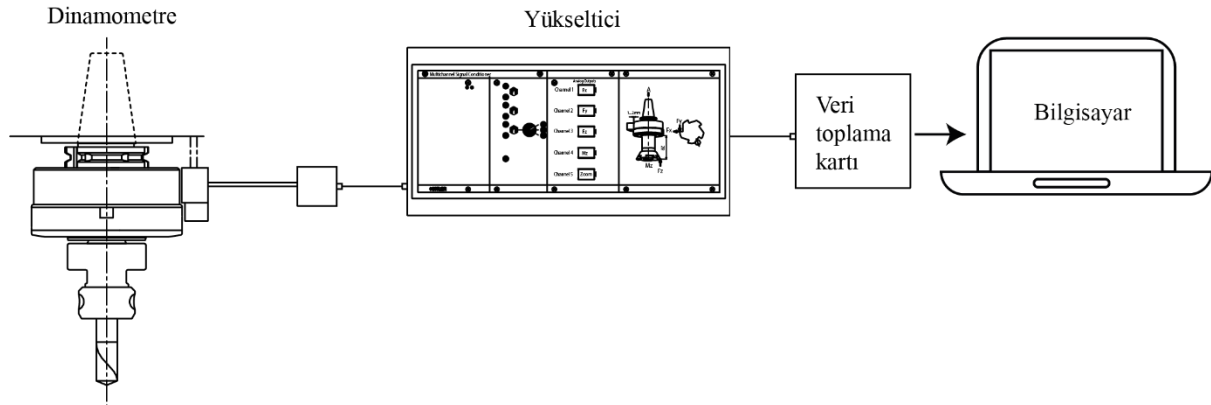
$$\left. \begin{aligned} \bar{F}_x(\phi_{g,\varphi}, k_{1,2}) &= -\frac{N_z}{4} K_{rc} f - \frac{N_z}{\pi} K_{re} \\ \bar{F}_y(\phi_{g,\varphi}, k_{1,2}) &= \frac{N_z}{4} K_{tc} f + \frac{N_z}{\pi} K_{te} \\ \bar{F}_z(\phi_{g,\varphi}, k_{1,2}) &= \frac{N_z}{\pi} K_{ac} f + \frac{N_z}{2} K_{re} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Farklı ilerleme değerlerinde hesaplanan ortalama kuvvet verileri kullanılarak yapılan doğrusal regresyon ile kesme kuvveti katsayıları, *Denklem (13)*'de verildiği gibi hesaplanabilir:

$$\left. \begin{aligned} K_{tc} &= \frac{4\bar{F}_{yc}}{N_z}, K_{rc} = -\frac{4\bar{F}_{xc}}{N_z}, K_{tc} = \frac{\pi\bar{F}_{zc}}{N_z} \\ K_{te} &= \frac{\pi\bar{F}_{ye}}{N_z}, K_{re} = -\frac{\pi\bar{F}_{ze}}{N_z}, K_{ae} = \frac{2\bar{F}_{ze}}{N_z} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

2.3. Deneysel Düzenek ve Verilerin Optimizasyonu

Gerçekleştirilen deneylerde, otomotiv, uçak ve diğer birçok alanda sıklıkla kullanılan mühendislik malzemesi AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliği kullanılmıştır. Malzemenin sertliği Brinell sertlik ölçme cihazında üç tekrarlı olarak ölçülmüş ve ortalama sertlik değeri 304 HB olduğu görülmüştür. Kesici takım olarak, 9,5mm kesici çapında Tungsten karbür(WC) hammaddesinden özel olarak üretilmiş, AlCrN kaplamalı ve 38° helis açısına sahip parmak freze kullanılmıştır. Deneyler Haas VF 2 SS marka ve model olan 5 eksen CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri için Kistler Type 9123C marka ve model üç eksenli kuvvet ve tork ölçebilen dönel dinamometre kullanılmış ve sistemin şematik gösterimi *Şekil 4*'te verilmiştir. Kullanılan ölçüm sisteminde, kesme kuvvetleri dinamometrede piezo-elektrik şarj oluşturur ve bu sinyal bir yükselticiye gönderilerek belirli bir katsayı ile yükseltilir. Yükseltilen sinyal değerleri önce veri toplama kartına sonrada bilgisayara aktarılır. Bilgisayara aktarılan kuvvet değerlerinin olduğu sinyaller DynoWare isimli yazılım aracılığıyla okunur.



Şekil 4. Deneysel düzenek şeması.

Deneyssel olarak elde edilen ölçüm verileri yüksek örnekleme oranına sahip olup gürültü ihtiva etmektedir. Bu gürültülerin minimize edilmesi çalışmada sunulan yöntemin doğruluğu için önem taşımaktadır. Bu sebeple, verilerin işlenmesi var olan salınımları ve gürültüleri minimize edebilir. Elde edilen verilerin genel formunun bir sinüzoid olması sebebiyle sistemdeki kararsızlığı minimize etmek için Fourier yaklaşırması olarak bilinen matematiksel yöntem kullanılmıştır. Bir sinüzoidal fonksiyonun genel yapısı aşağıda verildiği gibidir:

$$y(t) = A_0 + C_1 \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (15)$$

Yukarıda verilen genel matematiksel formu sinüzoidal fonksiyonları ifade etse de eğri uydurmak için bir diğer alternatif formunu elde etmemiz gerekiyor:

$$y(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega_0 t) + B_1 \sin(\omega_0 t) \quad (16)$$

Temel amacımız, yukarıdaki denklemi doğrusal regresyondaki gibi minimize etmek ve katsayıları belirlemektir. *Denklem (16)* verilerin ayrıık zamanda olması sebebiyle toplam sembolüyle aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left\{ y_i - \left[A_0 + \sum_{k=1}^m (A_k \cos k\theta_i + B_k \sin k\theta_i) \right] \right\}^2 \quad (17)$$

Minimizasyonu sağlayacak olan denklem matris formunda yazılır:

$$\begin{bmatrix} n & \sum \cos \theta_i & \sum \sin \theta_i \\ \sum \cos \theta_i & \sum \cos^2 \theta_i & \sum \cos \theta_i \sin \theta_i \\ \sum \sin \theta_i & \sum \sin \theta_i \cos \theta_i & \sum \sin^2 \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i \cos \theta_i \\ \sum y_i \sin \theta_i \end{bmatrix}$$

Katsayılar matrisinde yer alan toplamlar için denklem çözülrse aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i &= 0; \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i = 0; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i &= \frac{1}{2}; \quad \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i = \frac{1}{2}; \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i \cos \theta_i &= 0; \end{aligned} \quad (18)$$

Sonuç olarak minimizasyonu sağlayacak denklemlerin matris formu aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} n & 0 & 0 \\ 0 & n/2 & 0 \\ 0 & 0 & n/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i \cos \theta_i \\ \sum y_i \sin \theta_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ve bu denklemlerin çözümü ile katsayılar aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$A_0 = \frac{\sum y_i}{n}; A_1 = \frac{2\sum y_i \cos(\theta_i)}{n}; B_1 = \frac{2\sum y_i \sin(\theta_i)}{n}; \quad (20)$$

Deneyssel olarak elde edilen ölçüm verilerinin hepsine bu işlem uygulanır ve her veri seti için en uygun sinüzoidal fonksiyon elde edilebilir.

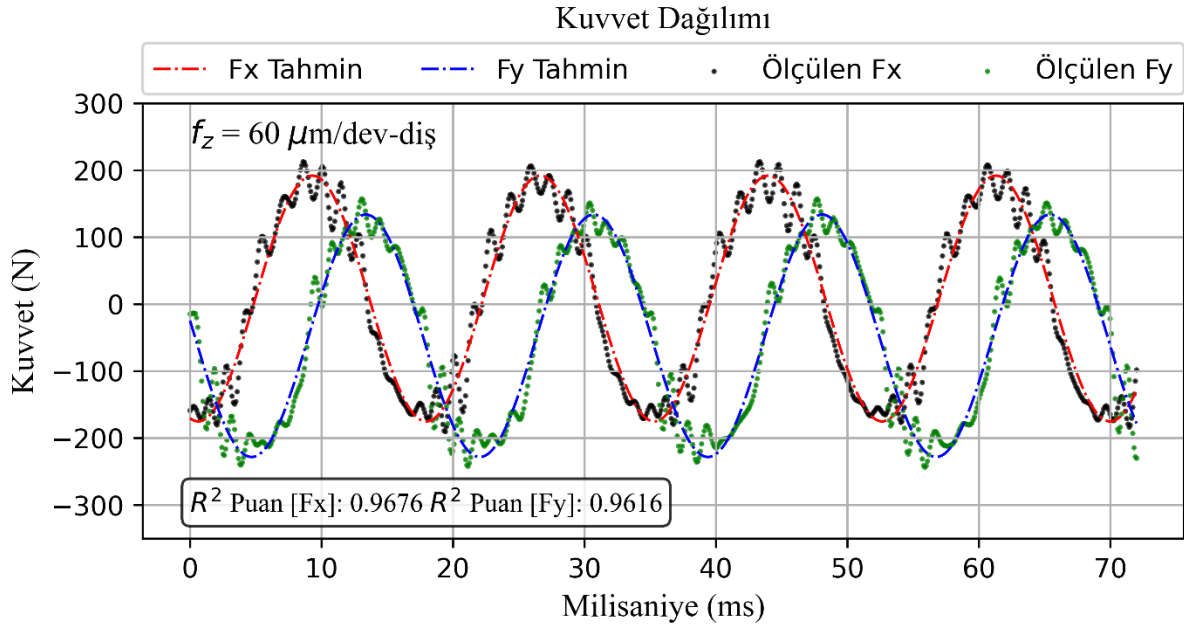
2.4. Kalibrasyon Deneyleri ve Kesme Katsayıları

Kalibrasyon deneyleri, *Tablo 1*'de verilen parametrelerle ve her parametre için aynı tip farklı takım kullanılarak üç tekrarlı yapılmıştır. Deneylerin özdeşliğini artırmak için numuneler aynı ölçülere işlenmiştir. Ayrıca numunelerin freze tezgahına bağlanması sırasında paralelliğin sağlanması için alt ve üst yüzeyler taşlanmıştır. Ölçüm cihazlarının yüksek hassasiyette olması ölçümlerin doğru ve kararlı sınır şartları içerisinde yapılmasını gerektirir. Bu nedenle, frezeleme deneylerinde doğru parametrelerin kullanılması gerekir. Bu çalışmada yapılan deney ölçümlerinin sağlıklı sonuç vermesi için uygun frezeleme parametreleri ön frezeleme deneyleri yapılarak önceden belirlenmiştir.

Tablo 1. Deney parametreleri ve F_x ve F_y için sinüzoidal optimizasyon doğruluk değerleri.

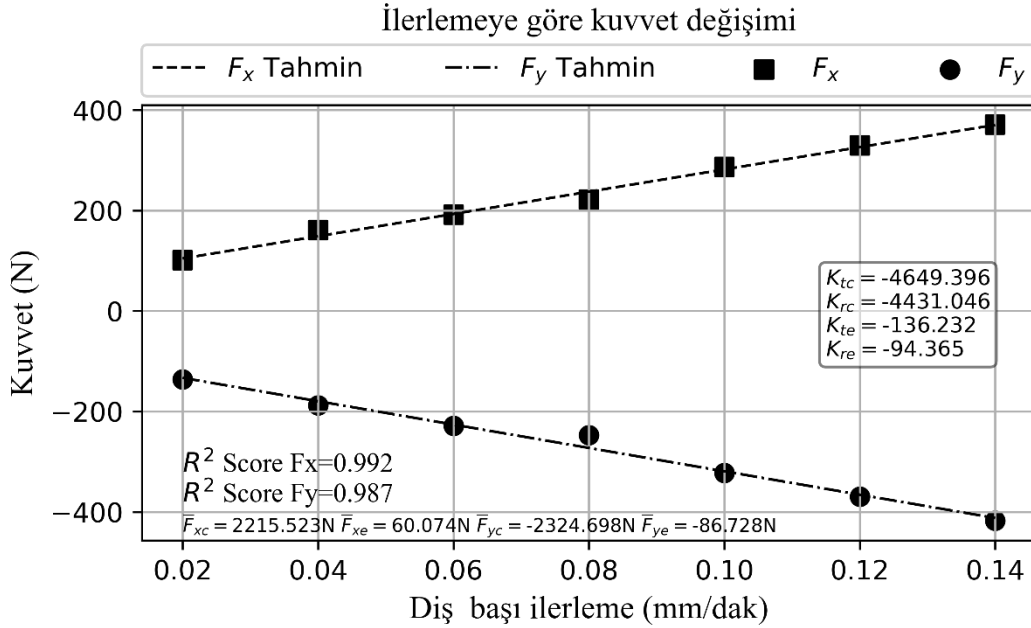
| Deney | Kesici Sayısı | İşlem | İlerleme μm | Eksenel Derinlik mm | $F_x - R^2$ | $F_y - R^2$ | Takım Çapı (mm) | Bağlama Boyu (mm) |
|----------|---------------|----------|------------------------|---------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------------|
| 1. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 20 | 0,5 | 0,889 | 0,933 | 9,507 | 23,242 |
| 2. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 40 | 0,5 | 0,948 | 0,938 | 9,525 | 23,181 |
| 3. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 60 | 0,5 | 0,968 | 0,962 | 9,488 | 23,175 |
| 4. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 80 | 0,5 | 0,957 | 0,957 | 9,511 | 23,292 |
| 5. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 100 | 0,5 | 0,974 | 0,975 | 9,507 | 23,253 |
| 6. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 120 | 0,5 | 0,975 | 0,972 | 9,492 | 23,162 |
| 7. Deney | 4 Dişli | Tam slot | 140 | 0,5 | 0,966 | 0,968 | 9,513 | 23,298 |

Deneyssel ölçümlerle elde edilen kuvvet verileri istenmeyen gürültü ve pikler ihtiva eder. Ölçüm verilerinde yer alan bu istenmeyen pikler ve gürültü, kesme mekaniğinin ve ölçüm sistemin doğası gereği kaçınılmazdır. Kesme sürecinde talaş biçimi, sıcaklık, takım ve malzeme yoğunluğu, takım geometrisi, kesme bölgesinden uzaklaştırılmayan talaş, takım tezgâhının yapısı, tezgâhtaki salgılar ve boşluklar gibi birçok parametre kuvvetlerin oluşumunda etkilidir. Tüm bu etkiler kuvvetlerin dalgalanmasına ve pikler oluşmasına neden olabilir. Etkisi çok azda olsa elektronik ölçme aletlerinde kuvvet sinyallerine karışan istenmeyen sinyaller, verilerin dalgalanmasına neden olur. Sonuç olarak, ölçümü yapılan işlenmemiş kuvvet verileri gürültülüdür ve bu gürültüler ortalama kesme kuvvetlerinin belirlenmesinde bir kararsızlığa neden olur. Kuvvet tahminlerinde kullanılan özel kesme katsayıları ortalama kuvvetlere dayanarak hesaplanır dolayısıyla ortalama kuvvet hesaplamalarında ortaya çıkan kararsızlık tahmin modelinin performansını olumsuz yönde etkiler. Ölçüm verilerindeki gürültüleri minimize etmek için frezeleme deneylerinden elde edilen ve ayrık yapıda bulunan kuvvet verileri çalışmada sunulan matematiksel yöntemle optimize edilmiş ve sürekli zaman kuvvet fonksiyonları elde edilmiştir. Yapılan çok sayıda deney verisine optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Belirli bir parametre için yapılan herhangi bir deneyden elde edilen sinüzoidal fonksiyonun grafiği (*Şekil 5*)'de verilmiştir.



Şekil 5. 60 μm ilerleme hızı için kuvvet verilerine uydurulan sinüzoidal fonksiyonun grafiği.

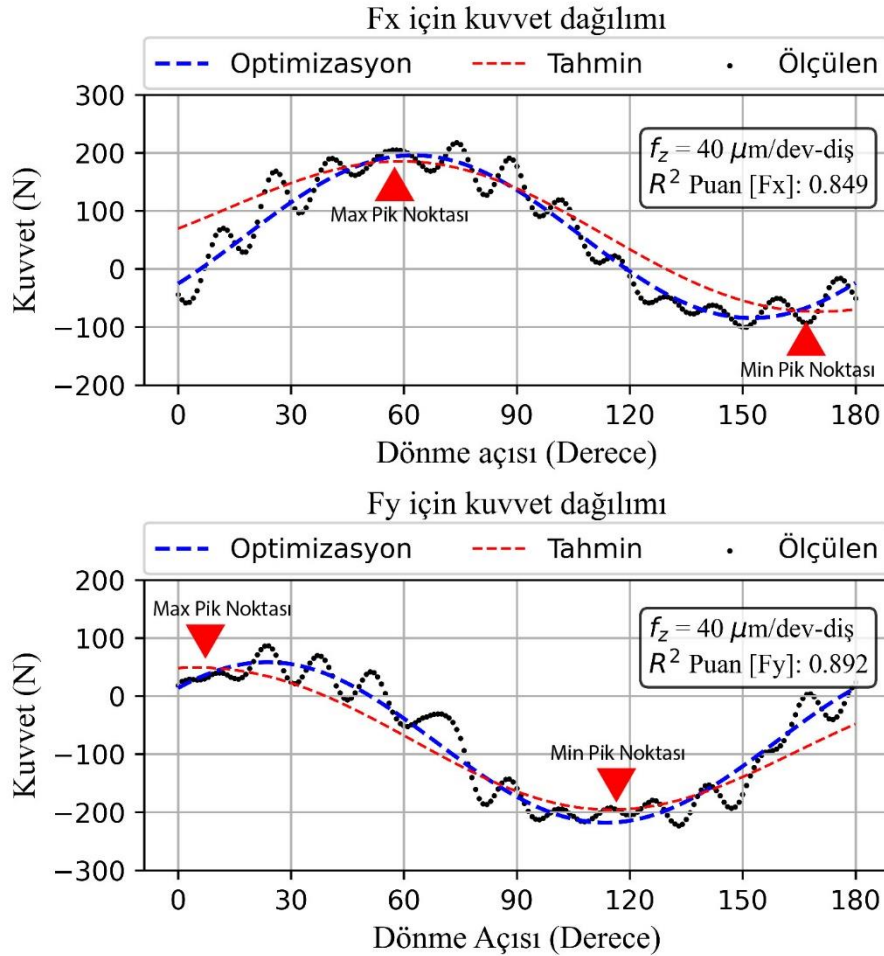
Fourier yaklaşımını ile optimize edilen kuvvet sinyallerinin, gerçek kuvvet verilerine göre performansları R^2 denklemine göre performansları *Tablo 1*'de verilmiştir. Çalışmada sunulan matematiksel yöntemle optimize edilen kuvvet fonksiyonları kullanılarak, ortalama kuvvet değerlerine dayalı olarak doğrusal regresyon ile hesaplanan kesme katsayıları *Şekil 6*'da verilmiştir.



Şekil 6. İlerlemeye göre kuvvet değişimi ve hesaplanan kesme katsayıları.

3. TARTIŞMALAR (DISCUSSIONS)

Dönel dinamometrenin ucuna bağlanan takımın dinamometre aracılığı ile iş miline bağlanması kesici takımın iş miline olan toplam mesafesini artırmıştır. Kesici takımın iş miline olan mesafenin fazla olması frezeleme işlemi sırasında kararsızlığın artması yönünde olumsuz etkiye neden olmuştur. Aynı zamanda kesicinin helis açısından kaynaklı talaş boşaltma yeteneğinin zayıf kaldığı ve bu durumun, kesilen talaşlardan bir kısmının kesme bölgesinden uzaklaştırılmamasına neden olduğu tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak, malzemeden kesilen talaş formu farklı ilerleme parametrelerinde farklı şekilde deformasyona uğradığı izlenmiştir. Talaş şekillerinin, talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılması sırasında, şekline bağlı olarak farklı etkilere neden olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak helisel şekilde deforme olan talaşların kesme bölgesine tekrar taşınmasının daha kolay olduğu ve kuvvet ölçümlerini etkilediği görüldü. Kuvvet ölçümlerinde talaş etkisini minimize etmek ve talaşın ortamdaki uzaklaştırılmasını sağlamak amacı ile frezeleme işlemleri hava soğutma şartları altında gerçekleştirildi. Tüm bu etkiler, sistemde bulunan salgı ve kararsızlıklarla beraber ölçüm verilerindeki gürültülerin ve istenmeyen piklerin nedeni olarak düşünülmektedir. Kaçınılmaz olan bu gürültülerin, çalışmada sunulan matematiksel yöntem ile minimize edilerek, mekanistik olarak belirlenen kesme katsayıları ile geliştirilen kuvvet tahmin modelinin farklı ilerleme hızı parametreleri için kullanılabilir olduğu çalışmada gösterildi. Deneysel olarak hesaplanan ve Şekil 6 ile verilen grafikteki kesme katsayıları kullanılarak, tam dalama frezeleme için yapılan kuvvet tahminleri ve deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 7’de verilmiştir. Yapılan tahminlerinin tepe ve çukur değerlerinin gerçek kuvvet ölçüm değerlerine oldukça uygun olduğu verilen grafikte gösterilmiştir.



Şekil 7. Deneysel sonuçlar ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, kesme kuvvetlerinin tahmini için optimize edilmiş kuvvet verileri kullanılarak mekanistik bir kuvvet tahmin modeli geliştirilmiştir. Modelin geliştirilmesi için öncelikle malzeme ve kesici takım çifti için kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Kuvvet ölçümlerindeki gürültü ve istenemeyen piklerin minimizasyonu için verilere uygulanan Fourier yaklaşırması yöntemi, kuvvet verilerine oldukça hızlı yakınsamıştır. Gerçek kuvvet verilerinden optimize edilen fonksiyonların performansları Tablo 1’de verilmiş ve oldukça iyi bir aralıkta gerçek verilere uyduğu görülmüştür. Bu kuvvet fonksiyonları kullanılarak, ortalama kuvvet kavramına dayalı yöntemle kesme katsayıları hesaplanmıştır (Şekil 6). Hesaplanan kesme katsayıları kullanılarak yarı analitik bir kuvvet tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin doğrulanması için 40 µm ilerleme hızında 500 µm aksenal derinlikte üç tekrarlı tam dalma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Model kullanılarak yapılan kuvvet tahminleri, deneyler ile elde edilen kuvvet ölçümleri ile karşılaştırılarak doğrulanmış ve grafikleri Şekil 7’de verilmiştir. Model ile elde edilen kuvvet tahminlerinin performansları determinasyon katsayısı ile değerlendirilmiş ve tahmin edilen kuvvetlerin Fx bileşeni %84,9 Fy bileşeni ise %89,2 oranlarında deneysel olarak ölçülen kuvvet değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Yapılan tahminlerde yaklaşık %10-15 oranlarında bir kararsızlık tespit edilmiştir. Bu kararsızlığın sebebi, yapılan kabuller, salgı ve talaş biçimi gibi parametrelerin tespitine atfedilebilir. Kararsızlığın minimize edilmesi için gerekli araştırmalar ileriki çalışmalarda sürdürülecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, BAP-FYL-2021-7274 nolu proje ile sağlanan finansal destek için Gazi Üniversitesi ve takımların temin edilmesindeki katkılarından dolayı kesici takım üreticisi Karcan Kesici Takım Sanayi ve Ticaret A.Ş firmasına teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. F. Kahraman, H. Bilge, and S. Öztürk, “Uncertainty analysis of milling parameters using Monte Carlo simulation, the Taguchi optimization method and data-driven modeling,” *Mater. Test.*, vol. 61, no. 5, pp. 477–483, 2019, doi: doi:10.3139/120.111344.
- [2] N. Özsoy and M. Özsoy, “Optimization of Surface Roughness of AISI 1040 Stainless Steel in Milling Process Using Taguchi Method,” *Sakarya University Journal of Science*, vol. 23, no. 1, pp. 113–120, 2018, doi: 10.16984/saufenbilder.466053.
- [3] E. Kuram and B. Ozcelik, “Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, no. 6, pp. 1849–1864, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.02.002.
- [4] İ. Korkut and M. A. Dönertaş, “Kesme Parametrelerinin Frezelemede Oluşan Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkileri,” *Politek. Derg.*, vol. 6, pp. 385–389, 2003, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/385965>.
- [5] S. S. Park and M. Malekian, “Mechanistic modeling and accurate measurement of micro end milling forces,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 49–52, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.03.060.
- [6] Y. V. Srinivasa and M. S. Shunmugam, “Mechanistic model for prediction of cutting forces in micro end-milling and experimental comparison,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 67, pp. 18–27, 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.12.004.
- [7] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design (2nd ed.)*, vol. 73, no. 6. 2012.
- [8] M. E. Merchant, “Mechanics of the metal cutting process. I. Orthogonal cutting and a type 2 chip,” *J. Appl. Phys.*, vol. 16, no. 5, pp. 267–275, 1945, doi: 10.1063/1.1707586.
- [9] W. B. Palmer and P. L. B. Oxley, “Mechanics of Orthogonal Machining,” *Proc. Inst. Mech. Eng.*,

- vol. 173, no. 1, pp. 623–654, 1959, doi: 10.1243/pime_proc_1959_173_053_02.
- [10] M. E. Merchant, “Basic mechanics of metal cutting process,” *J. Appl. Mech.*, vol. 11(A), pp. 168–175, 1944.
- [11] E. Budak, “Analytical models for high performance milling. Part I: Cutting forces, structural deformations and tolerance integrity,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–13, pp. 1478–1488, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.09.009.
- [12] F. Koenigsberger and A. J. P. Sabberwal, “An Investigation into The Cutting Force Pulsations During Milling Operations,” vol. I, no. 3, pp. 15–33, 1961.
- [13] S. Smith and J. Tlustý, “Overview of modeling and simulation of the milling process,” *J. Eng. Ind.*, vol. 113, no. 2, pp. 169–175, 1991, doi: 10.1115/1.2899674.
- [14] W. A. Kline, R. E. DeVor, and I. A. Shareef, “The Prediction of Surface Accuracy in End Milling,” *J. Eng. Ind.*, vol. 104, no. 3, pp. 272–278, Aug. 1982, doi: 10.1115/1.3185830.
- [15] E. J. A. Armarego and N. P. Deshpande, “Computerized Predictive Cutting Models for Forces in End-Milling Including Eccentricity Effects,” *CIRP Ann.*, vol. 38, no. 1, pp. 45–49, 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62649-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62649-3).
- [16] E. Budak, Y. Altıntaş, and E. J. A. Armarego, “Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 118, no. 2, pp. 216–224, 1996, doi: 10.1115/1.2831014.
- [17] Y. Altıntaş, A. Spence, and J. Tlustý, “End Milling Force Algorithms for CAD Systems,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 31–34, 1991, doi: 10.1016/S0007-8506(07)61927-1.
- [18] P. Lee and Y. Altıntaş, “Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 36, no. 9, pp. 1059–1072, 1996, doi: 10.1016/0890-6955(95)00081-X.
- [19] M. A. Rubeo and T. L. Schmitz, “Milling Force Modeling: A Comparison of Two Approaches,” *Procedia Manuf.*, vol. 5, pp. 90–105, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.010.
- [20] A.J.P. Sabberwal, “An investigation into the chip section and cutting force during milling operation,” Victoria University of Manchester, 1961.
- [21] M. Wang, L. Gao, and Y. Zheng, “An examination of the fundamental mechanics of cutting force coefficients,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 78, pp. 1–7, 2014, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.10.008.

Investigation of Effect of Green Density on Quenching and Tempering Behaviors of High Carbon Powder Metallurgy Steels

Tolga YILMAZ^{1,*}  Dilan Zehra SEVİNDİROĞLU¹  Atakan SUVAY¹ 

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 2.12.2022
Revision: 7.12.2022
Accepted: 8.12.2022

Highlights

- Effect of Heat Treatment and Different Pressing Pressure on High Carbon Powder Metallurgy Steels

Keywords

Powder Metallurgy
High Carbon Steel
Heat Treatment
Pressing Pressure
Microstructure

In this study, the effects of different unidirectional pressing pressures of 400 MPa and 800 MPa on the microstructure and hardness of 1.2% carbon steel were investigated. Changes in microstructure and hardness with heat treatments were reported.

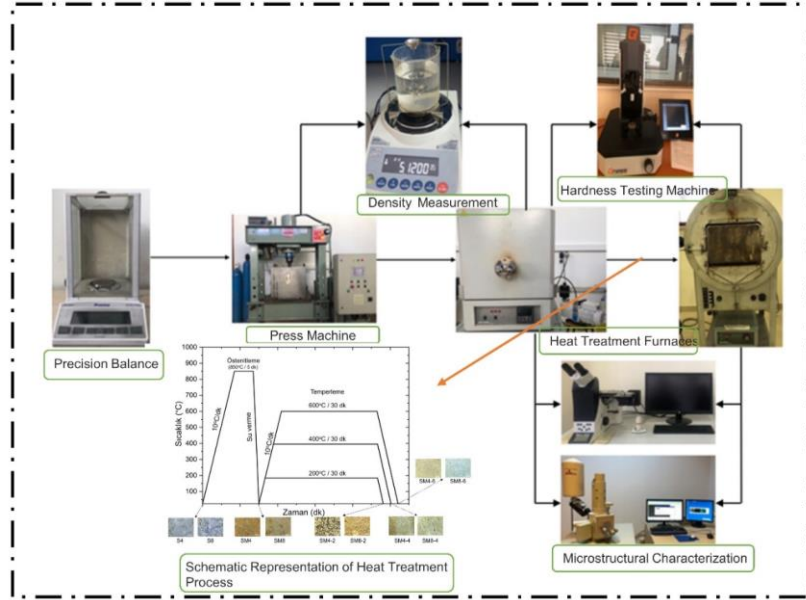


Figure A. Schematic representation of the production and characterization processes

Purpose: The aim of this study is to investigate the effect of pressing pressure and heat treatment on microstructure and hardness of high carbon steels produced via powder metallurgy.

Theory and Methods: The samples were produced via powder metallurgy method under two different pressing pressures of 400 MPa and 800 MPa and, afterward sintered at 1200°C for 20 min in a vacuum atmosphere. The samples were austenitized at 850°C for 5 min and then water-quenched followed by tempering at 200°C, 400°C and 600°C for 30 min. Characterization studies were conducted by optical microscope, scanning electron microscope, X-ray diffraction and Vickers hardness method.

Results: The densities of the sintered samples increased by about 15% compared to the samples as pressed condition. The porosity was reduced by about 13% at the higher pressing pressure of 800 MPa. While the samples as quenched condition had the highest hardness values, the hardness values decreased with increased tempering temperatures.

Conclusion: The samples underwent the same heat treatment process in different pressing pressures showed the hardness values of the samples pressed at 800 MPa are approximately 2 times higher than the samples pressed at 400 MPa.



Investigation of Effect of Green Density on Quenching and Tempering Behaviors of High Carbon Powder Metallurgy Steels

Tolga YILMAZ^{1,*} Dilan Zehra SEVİNDİROĞLU¹ Atakan SUVAY¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

In this study, steel samples containing 1.2% carbon were produced at different unidirectional pressing pressures of 400 MPa and 800 MPa by Powder Metallurgy method. The produced samples were sintered at 1200°C for 20 minutes in a vacuum atmosphere. After measuring the green density and hardness values of the sintered samples, the phase volume ratios and pore amounts were calculated. After these processes, the samples were austenitized at 850°C for 5 minutes, then immediately subjected to quenching, accordingly a martensitic structure was obtained. Tempering heat treatment was applied at 200°C, 400°C and 600°C to improve the hard and brittle properties of the martensitic structure. The effect of heat treatment and pressure differences on the microstructure and hardness value of the material was investigated. As a result of these examinations, as the pressing pressure increased, the density of the sintered samples increased and accordingly, the pearlite volume fraction was higher at 800 MPa pressure, while the porosity amount decreased. Due to the effect of the porosity amount on the mechanical properties of the samples produced by powder metallurgy, the hardness values of the samples with a pressing pressure of 800 MPa were higher than the samples exposed a pressing pressure of 400 MPa, which underwent the same heat treatment.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 2.12.2022
Düzeltilme: 7.12.2022
Kabul: 8.12.2022

Keywords

Powder Metallurgy
High Carbon Steel
Heat Treatment
Pressing Pressure
Microstructure

Anahtar Kelimeler

Toz Metalurjisi
Yüksek Karbonlu Çelik
Isıl İşlem
Presleme Basıncı
Mikroyapı

Yüksek Karbonlu Toz Metalurjisi Çeliklerinin Su Verme ve Temperleme Davranışlarına Ham Yoğunluk Etkisinin İncelenmesi

Öz

Bu çalışmada Toz Metalurjisi yöntemi ile 400 MPa ve 800 MPa tek yönlü farklı preslenme basınçlarında %1,2 karbon içeren çelik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 1200°C'de 20 dakika vakum atmosferinde sinterlenme işlemine bırakılmıştır. Sinterlenen numunelerin ham yoğunluk ve sertlik değerleri ölçüldükten sonra faz hacim oranları ve gözenek miktarları hesaplanmıştır. Bu işlemlerden sonra numuneler 850°C'de 5 dakika östenitlendikten sonra su verme işlemine tabi tutulmuştur ve martenzitik bir yapı elde edilmiştir. Martenzitik yapının sert ve kırılğan özelliğini iyileştirmek için 200°C, 400°C ve 600°C'de temperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Yapılan ısıl işlem ve basınç farklılıklarının malzemenin mikroyapı ve sertlik değerine etkisi incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda presleme basıncı arttıkça sinterlenen numunelerin yoğunluğu artmış buna bağlı olarak 800 MPa basınçta perlit oranı daha yüksek çıkarken gözenek oranı azalmıştır. Toz metalurjisi ile üretilen numunelerde gözenek oranının mekanik özelliklere etkisi sebebiyle presleme basıncı 800 MPa olan numuneler aynı ısıl işlemi görmüş olan presleme basıncı 400 MPa olan numunelere göre sertlik değerleri daha yüksek çıkmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz metalürjisi (T/M), metal tozlarının belirli oranlarda karıştırılarak, metal tozlarının oda sıcaklığında özel kalıplarda, istenilen teknik değerlere uygun basınçlarda tozların sıkıştırılması ve kontrollü atmosferlerde sinterlenmesi ile parça üretme yöntemidir [1, 2]. Toz metalürjisi 20. yüzyılın başlarında endüstriyel olarak kullanılmaya başlandıktan sonra çeşitli alanlarda genişleyerek günümüzde önemli bir üretim yöntemi haline gelmiştir [3]. Demir tozu veya demir alaşımlı toz metalürjisinin son yıllarda büyümesi, işleme, döküm, dövme ve diğer benzer metal işleme teknolojilerine düşük maliyetli bir alternatif olarak kendini kanıtlamıştır [4-6]. Toz metalürjisi yönteminde; çok az malzeme kayıplarının yaşanması, zor ve karmaşık geometrik parçaların üretilebilmesi, nihai üründen sonra talaşlı imalatın gerek olmaması ya da gerek duyulan kısmın az olması, diğer yöntemlerle üretilen parçalara kıyasla daha iyi bir yüzey kalitesine sahip olması gibi avantajları var olduğundan endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bulk malzemelere kıyasla toz metalürjisi yöntemiyle üretilen parçalara örnek olarak; süperalaşımlar, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, nükleer malzemeler verilebilir [3, 7-9].

Toz metalürjisinin büyümesi, alaşım geliştirme, toz üretme, bağlayıcılar, yağlayıcılar ve parça üretim yöntemleri yoluyla desteklenirken, diğer taraftan endüstride var olan diğer yöntemler sonucu üretilen ürünlerden daha yüksek yoğunluğuna sahip ürünler üretebilmesine bağlıdır [4].

Toz metalürjisi ile üretilen parçalar yoğunluk, bileşim ve mikroyapı ile karakterize edilerek optimize edilir. Toz karışımların sinterlenmesi ve ek ısıl işlemler, performansı istenen şekilde karşılayacak mikroyapıyı oluşturur. Bu ek işlemlerin amacı, malzemenin işlenebilirliğini iyileştirmek, iç gerilmeleri azaltmak, mekanik özellikleri, esnekliği, mukavemeti, sertliği ve tokluğu iyileştirmek, tane boyutunu değiştirmek, ısı ve korozyon direncini arttırmak, elektriksel ve manyetik özellikleri değiştirmek olabilmektedir [1, 4, 5, 10, 11]. Sinterleme işlemi geleneksel olarak sinterleme fırınları ve parti fırınları ile yapılırken hızlı sinterleme yöntemleri indüksiyon, mikrodalga, plazma, lazer ve deşarj sinterleme olarak geleneksel yöntemlere alternatiftir [12-14].

Toz metalürjisinde önemli parametrelerden birisi de preslemedeki basınç miktarıdır. Sıkıştırma ile tozu mukavemeti olan bir kütleyle getirir [15]. Bu preslemeyle oluşturulan kütlede basınç miktarına bağlı olarak gözenek miktarı, yoğunluk, sertlik ve mikroyapısında değişiklikler görülebilir. Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi kullanılarak, yüksek karbonlu çelik farklı presleme basınçlarında üretilmiştir. Preslemede basınç farklılıklarının mikroyapı, yoğunluk ve sertlik özellikleri üzerine etkileri incelendikten sonra ısıl işlem parametreleri ile mikroyapısal dönüşümler araştırılmıştır.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneyisel çalışma için Nanokar Nanotechnology firma tarafından sağlanan %99,99 saflıkta, 5 µm boyutunda demir (Fe) tozu ve karbon ilavesi olarak Alfa Aesar markalı %99,9995 saflıkta, 74µm boyutunda grafit Tablo 1’de verilen oranlarda ilave edilmiştir. Hazırlanan bu karışım tozları Hidroliksan marka 160 ton kapasiteli tek yönlü presleme cihazında oda sıcaklığında iki farklı presleme basınçlarında 400 MPa ve 800 MPa preslenerek ham numuneler elde edilmiştir.

Tablo 1. Toz Metal Çeliğin Kimyasal Kompozisyonu

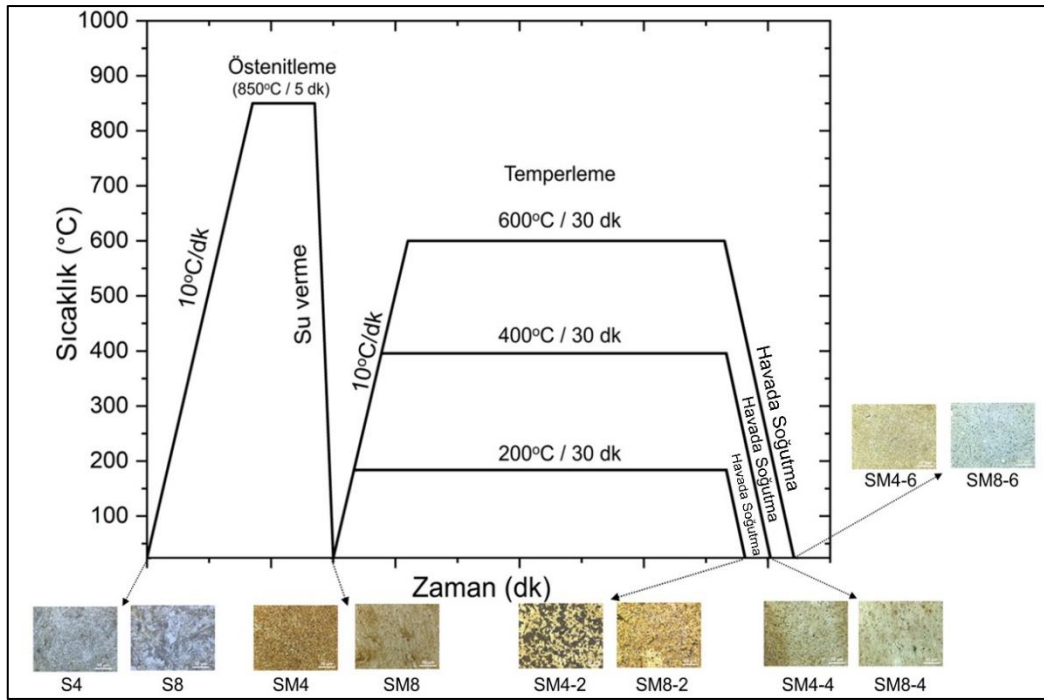
| % Bileşim Oranları | Grafit (% ağırlık) | Fe (% ağırlık) |
|--------------------|--------------------|----------------|
| | | 0,12 gram |

Preslenmiş numunelerin sinterleme işlemi SFL marka yatay yüksek sıcaklık fırınında vakum (5×10^{-2} Pa) altında 7 °C/dk ısıtma hızı kullanılarak 1200 °C’de 30 dakika süre ile sinterlenmiş ve 20 °C/dk soğutma hızı kullanılarak fırın ortamından oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Sinterlenen numuneler S4 (400 MPa) ve S8 (800 MPa) olarak kodlanmıştır. Numunelerin kodlanması uygulanan presleme basıncı ve ısıl işlem prosesine göre gerçekleştirilmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Üretilmiş numunelerin kodları

| Kod | Açıklama |
|-------|--|
| S4 | 400 MPa basınçta presleme + 1200°C'de 30 dakika süre ile sinterlenmiş numune |
| S8 | 800 MPa basınçta presleme + 1200°C'de 30 dakika süre ile sinterlenmiş numune |
| SM4 | S4 numunesinin 850 °C'de 5 dakika östenitlenip su verilmiş numunesi |
| SM8 | S8 numunesinin 850 °C'de 5 dakika östenitlenip su verilmiş numunesi |
| SM4-2 | SM4 numunesinin 200 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |
| SM4-4 | SM4 numunesinin 400 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |
| SM4-6 | SM4 numunesinin 600 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |
| SM8-2 | SM8 numunesinin 200 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |
| SM8-4 | SM8 numunesinin 400 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |
| SM8-6 | SM8 numunesinin 600 °C'de 30 dakika temperlenmiş numunesi |

Sinterlemeden sonra, tüm ısıl işlem döngülerinin şematik özeti Şekil 1'de verilmiştir. S4 ve S8 numuneleri 850 °C'de 5 dakika östenitleme işlemi yapıldıktan sonra martenzitik bir yapı elde etmek için oda sıcaklığında su verme işlemi yapılmıştır ve bu numuneler sırasıyla SM4 ve SM8 olarak kodlanmıştır. SM4 ve SM8 numunelerine 200-400-600 °C'lerde 30 dakika temperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu uygulanan ısıl işlem sonrası numunelerin kodları sırasıyla presleme basıncı 400 MPa için SM4-2, SM4-4 ve SM4-6 iken 800 MPa için SM8-2, SM8-4 ve SM8-6 olmuştur.

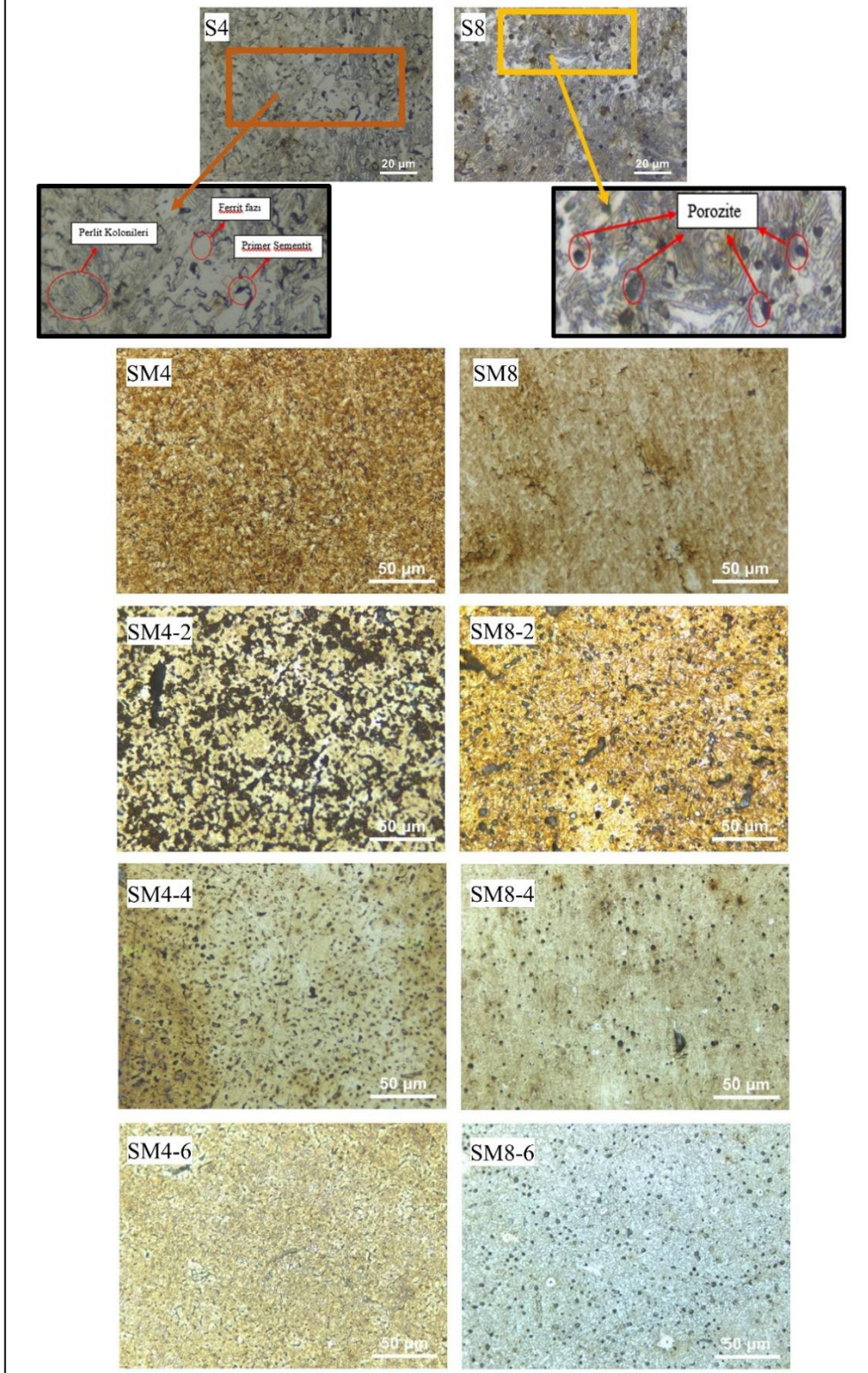
**Şekil 1.** Isıl işlem döngüsünün şematik sunumu

Numuneler, metalografik inceleme için bakalite alınmış ve standart metalografi teknikleriyle 120-1200 # zımpara işlemi yapıldıktan sonra, 6-3-1 µm solüsyonlar kullanılarak polisaj işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı elde edilmek amacıyla, numunelerin yüzeyine dağılayıcı olarak % 3'lük Nital çözeltisi (3 ml HNO₃ - 97 ml ethanol) kullanılmıştır. Mikroyapı incelenmesinde Leica DM5000M optik mikroskop ve JEOL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. XRD analizleri Bruker D8 Advance cihazında 40 kV ve 40mA'da yapılmıştır. Sertlik ölçümlerinde Qness GmbH Q30 M marka cihaz kullanılarak Vickers (HV-1) sertlik metodu kullanılmıştır. Bu sertlik değerlerinin belirlenmesinde 5 farklı noktadan sertlik değerleri alınmış ve aritmetik ortalamaları verilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Mikroyapılar (Microstructures)

Farklı presleme basıncı ve farklı temperleme sıcaklıklarında üretilen numunelerin optik mikroyapıları Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Numunelerin optik mikroyapıları

400 ve 800 MPa'da preslendikten sonra sinterlenen numunelerin mikroyapılarında perlit gözlenmiştir (Şekil 2. S4,S8). Buradaki perlit oranı basınca göre değişiklik göstermiş olup, 400 MPa basınçta üretilen S4 kodlu numunede perlit oranı yaklaşık olarak %63 iken 800 MPa basınçtaki üretilen S8 kodlu numunede perlit oranı yaklaşık olarak %79 olarak belirlenmiştir.

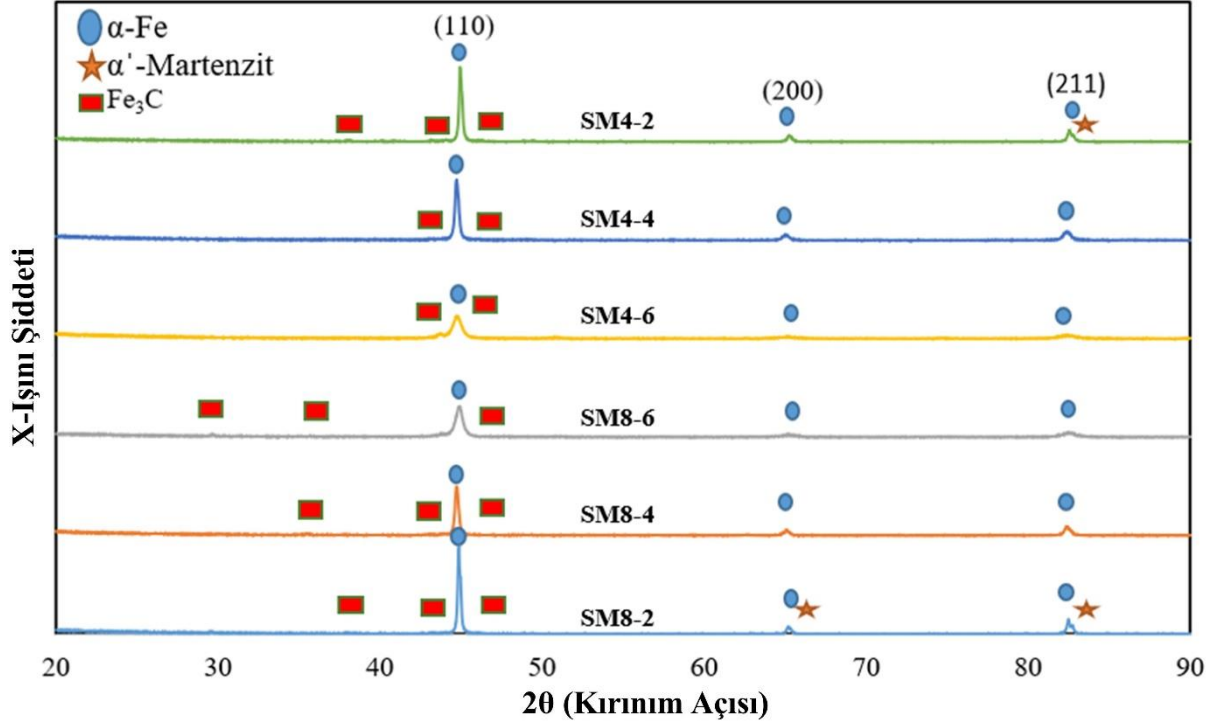
Tablo 3'te 400 ve 800 MPa presleme basınçlarında üretilen numunelerin presleme sonrası (ham) yoğunluk, sinterleme sonrası yoğunluk ve % gözenek miktarı verilmiştir. Burada ham numunelerin yoğunlukları sırasıyla 5,12 g/cm³ ve 5,98 g/cm³ olarak tespit edilirken, sinterlenen numunelerin yoğunlukları 5,85 g/cm³ ve 6,91 g/cm³ olarak bulunmuştur (Tablo 3). Sinterleme sonrası her iki farklı presleme basıncında(400 MPa, 800 MPa) üretilen ham numunelerin yoğunlukları yaklaşık olarak %15 artmıştır. Numunelerin sinterleme sonrası yoğunluklarının yükselen presleme basıncıyla arttığı ve buna bağlı olarak gözenek miktarının daha yüksek basınçta olan S8 kodlu numunesinde azaldığı görülmüştür.

Tablo 3. Toz metalurjisi ile üretilmiş numunelerin yoğunluk ve % gözeneklik oranları

| Numune | Presleme Sonrası Yoğunluk (g/cm ³) | Sinterleme Sonrası Yoğunluk(g/cm ³) | Sinterleme Sonrası Yoğunluk (%) | Gözenek Oranı (%) |
|--------------|--|---|---------------------------------|-------------------|
| S4 (400 MPa) | 5,12 | 5,85 | 75,96 | 24,04 |
| S8 (800 MPa) | 5,98 | 6,91 | 88,59 | 11,41 |

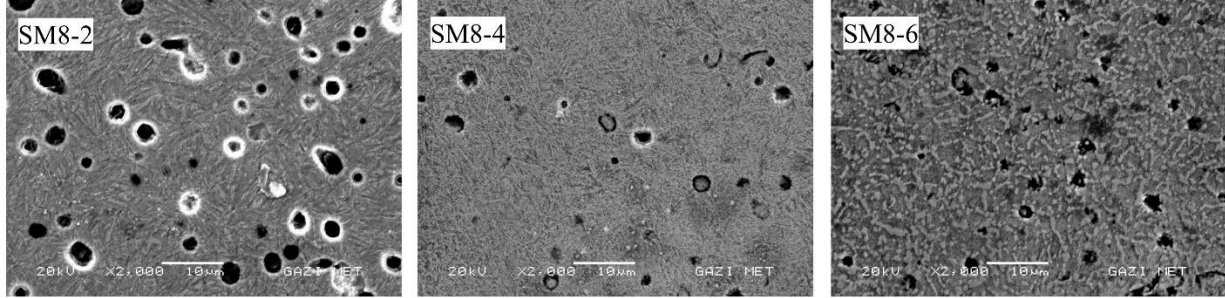
3.2. XRD ve SEM Çalışmaları (SEM and XRD Studies)

Şekil 3'te su verme+temperleme işlemi uygulanan numunelerin XRD desenleri verilmektedir. SM8-2 kodlu numunede martenzit fazının pik şiddetinin daha fazla olduğu görülmektedir. SM4-2 numunede de az miktarda martenzit pikinin varlığı belirlenmiştir. Bu durum literatürde yer alan önceki çalışmalarla uyumaktadır [16-18]. Tüm numunelerde Fe₃C pikleri tespit edilmiştir.



Şekil 3. Numunelerin XRD desenleri

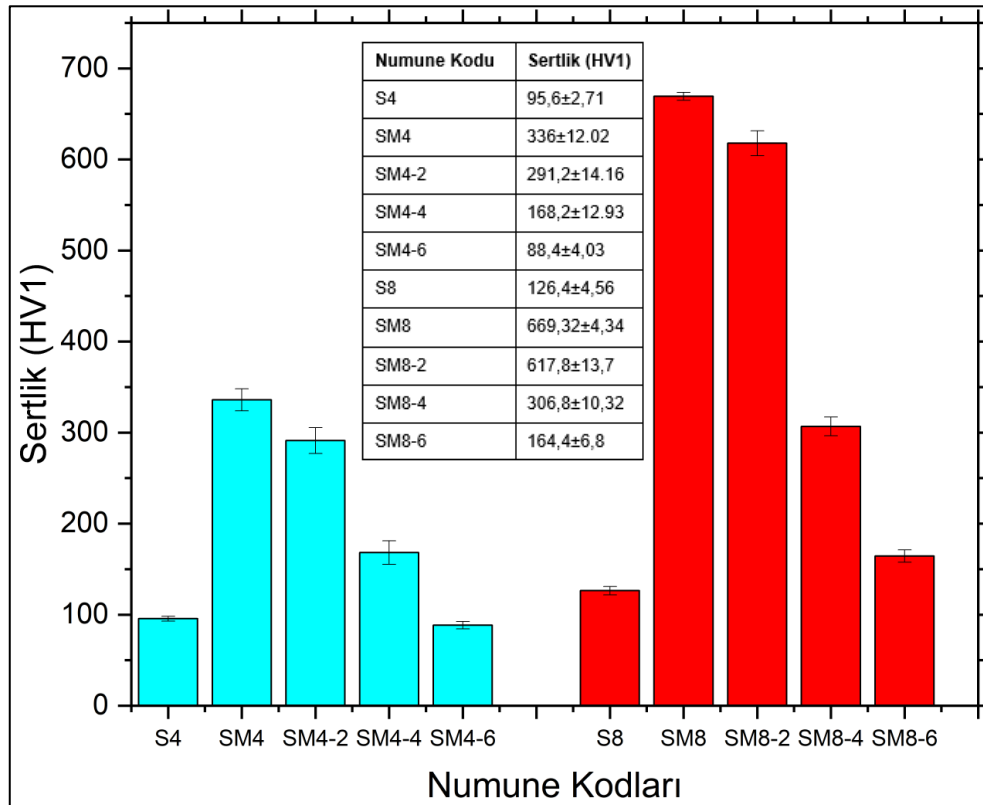
Şekil 4'te verilen SM8-2, SM8-4 ve SM8-6 numunelerinin SEM görüntüleri sunulmaktadır. 800 MPa basınç altında üretilen bu numunelerin SEM mikrografileri incelendiğinde su verme sonrası elde edilen çıta tipi martenzitlerin, artan temperleme sıcaklığı ile bozunmaya başladığı, ve bu bölgelerde sementit parçacıkları çöktüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 800 MPa presleme basıncında üretilen numunelerin SEM görüntüleri

3.3. Sertlik Sonuçları (Hardness Results)

Numunelerin sertlik değerleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görülebileceği üzere farklı basınçta üretilen numuneler gruplandırılarak verilmiş ve aynı ısıl işlem görmüş numuneler farklı basınçtaki numunelerle karşılaştırıldığında 800 MPa basınç ile üretilmiş numunelerin 400 MPa basınç ile üretilmiş numunelere göre sertliğin daha yüksek olduğu elde edilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin sertlik değerleri

800MPa basınç altında üretilen numunelerin sertlik değerinin, 400MPa basınç altında üretilen numunelere göre yüksek oluşunun nedeni olarak mikroyapılarında daha düşük gözenek oranına ve buna bağlı olarak daha homojen mikroyapıların oluşması görülmektedir. Temperleme sıcaklığı (200-400-600 °C) arttıkça sertlik değerlerindeki düşme martenzitin bozunmasına dayandırılmaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, %1,2 karbon içeren çeliğin 400 MPa ve 800 MPa tek yönlü farklı presleme basınçlarının mikroyapı ve sertliğe etkisi araştırılmıştır. Yapılan ısıl işlemlerle mikroyapı ve sertliğin değişimleri incelenmiştir. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Presleme basıncı fark etmeksizin sinterleme işlemi numunenin yoğunluğunu yaklaşık olarak %15 artmıştır.
2. Sinterleme sonucu oluşan gözenek miktarı S4 numunesinde %24,04 iken S8 numunesinde %11,41 olarak tespit edilmiştir. S8 numunesinin gözenek oranının daha yüksek presleme basıncı sayesinde yaklaşık %13 azaldığı belirlenmiştir. Azalan gözenek miktarına bağlı olarak S4 numunesindeki %63 perlit oranının, S8 numunesinde %79 perlit oranına artmasında etkili olduğu görülmüştür.
3. Su verme işlemi sonrası mikroyapının martenzitik yapıya dönüşmesiyle SM4 numunesinin sertlik değeri 336 HV, SM8 numunesinin sertlik değeri 669 HV olarak bulunmuştur.
4. Presleme basıncı 800 MPa olan temperleme sıcaklıkları 200-400-600°C'lerdeki numunelerin (SM8-2, SM8-4, SM8-6) sertlik değerleri sırasıyla 617-316-164 HV elde edilmiştir. Presleme basıncı 400 MPa olan temperleme sıcaklıkları 200-400-600°C'lerdeki numunelerin (SM4-2, SM4-4, SM4-6) sertlik değerleri sırasıyla 336-291-88 HV elde edilmiştir. Presleme basıncı yüksek (800MPa) olan numunelerin sertlik değeri 2 katına çıkmıştır.
5. Temperleme sıcaklığı arttıkça martenzitik yapının bozunması matrisin sertliğinde azalmasına sebep olmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanmış olduğumuz alt yapı ve laboratuvar imkânlarının kurulmasını sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Güney K. C., Şahin B., Altuntaş O., Güral A., Hardness and microstructural characterization of powder metallurgy steel subjected to martempering heat treatment. International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Devices Applications; Exhibition (ICMATSE), (2020) 120-124.
- [2] Yıldırım S. (1999). Fe-Ferrokrom Tozundan Elde Edilen Kompozitin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [3] Erden M., Presleme basıncının toz metalürjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1):257-264, (2017).
- [4] Narasimhan K., Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy. Materials Chemistry and Physics, 67:56-65, (2001).
- [5] Narasimhan K.S., Recent advances in ferrous powder metallurgy. Advanced Performance Materials, 3(1):7-27, (1996).
- [6] Chawla N., Deng X., Microstructure and mechanical behavior of porous sintered steels. Materials Science and Engineering: A, 390(1):98-112, (2005).
- [7] Erden M.A., Toz metalürjisi ile üretilen alaşımsız çeliklerde nikel ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisinin araştırılması. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C Tasarım ve Teknoloji, 4(4):241-245, (2016).
- [8] Altuntaş, G., Altuntaş, O., Bostan, B. Characterization of Al-7075/T651 Alloy by RRA Heat Treatment and Different Pre-deformation Effects. Transactions of the Indian Institute of Metals, 74(12), 3025-3033, (2021).

- [9] Altuntaş, G., Bostan, B. Metallurgical characterization of natural aging effects on pre-deformed Al 7075/T651 alloy during retrogression and re-aging heat treatment. *Kovove Materialy*, 60(4), (2022).
- [10] Şimşek İ., Özyürek D., Şimşek D., Farklı presleme basınçları ile üretilen toz metal çeliklerin aşınma davranışlarının belirlenmesi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(ÖS):54-62, (2019).
- [11] Simchi A., Danninger H., Effects of porosity on delamination wear behaviour of sintered plain iron. *Powder Metallurgy*, 47(1):73-80, (2004).
- [12] Atik E., Çivi C., Kökey C., Eyici G., Toz metal parçalar ile çelik parçaların indüksiyon ile sinterleme yöntemiyle birleştirilmesi. 31(ÖS):117-122, (2016).
- [13] Akpınar G., Çivi C., Atik E., Farklı sürelerde indüksiyonla sinterlenen demir esaslı toz metal burçların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendis ve Makina*, 55(649):31-37, (2014).
- [14] Çavdar U., Atik E., Geleneksel ve hızlı sinterleme yöntemleri. *Celal Bayar Üniversitesi Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(15):31-37, (2014).
- [15] Sarıtaş S., Türker M., Durlu N. (2007). Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri. *Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, Ankara, 228.
- [16] Altuntaş, G., Altuntaş, O., Öztürk, M. K., Bostan, B. Metallurgical and Crystallographic Analysis of Different Amounts of Deformation Applied to Hadfield Steel. *International Journal of Metalcasting*, 1-10.17, (2022).
- [17] Altuntaş, O., Güral, A., Tekeli, S. Microstructure engineering for superior wear and impact toughness strength of hypereutectoid powder metallurgy steel. *Powder Metallurgy*, 65(2), 101-111, (2022).
- [18] Altuntaş, O., Güral, A. Effect of spheroidizing heat treatment on the microstructure, hardness and toughness of high carbon powder metallurgy steel. *Kovove Materialy*, 55(5), 303-310, (2017).

Investigating Mechanical Strength of Epoxy/SiO₂ Superhydrophobic Coatings Prepared by Spray Coating Method

Ali Haydar GÜNEŞ^{1,*}  Sinan FİDAN² 

¹Istanbul Bilgi University, School of Advanced Vocational Studies, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, 34387, Sisli/Istanbul

²Kocaeli University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Airframe and Powerplant Maintenance, 41380, Kartepe/KOCAELI

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 22.02.2022
Revision: 4.09.2022
Accepted: 10.10.2022

Highlights

- Mechanical durability
- Spray coating
- Superhydrophobic

Keywords

Epoxy
Mechanical durability
Silica
Spray coating
Superhydrophobic

Purpose: In this study, it was aimed to determine the effect of the production parameters on the mechanical abrasion resistance of epoxy/siloxane/SiO₂ superhydrophobic coatings prepared by the spray coating method.

Theory and Methods: In this study; epoxy was used as the binder, two different siloxanes were used in varying amounts to chemically modify the epoxy, and different amounts of SiO₂ nanoparticles were used to provide surface roughness. Coatings were produced with two different spraying times, 3 and 5 seconds. The effect of production parameters on the mechanical strength of the coating was investigated by sand impact abrasion test and linear abrasion test.

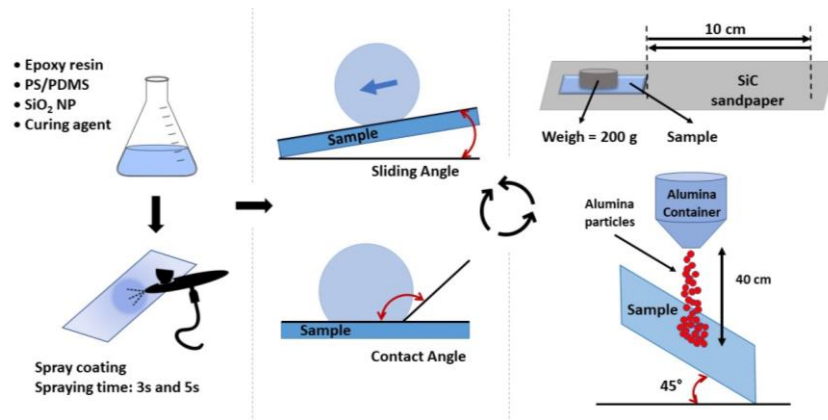


Figure A. Illustration for the preparation and test procedures of the superhydrophobic coatings

Results: In both siloxane types used in this study, it was determined that the wear resistance of coatings containing 75% by weight of nanoparticles compared to epoxy was higher than other nanoparticle concentrations. It has been observed that the coatings containing 30% by weight PS in EP-PS coatings compared to epoxy, and 30% and 40% PDMS in EP-PDMS coatings have high abrasion resistance. Another important result obtained in this study is the relationship between the spraying time of EP-PDMS coatings and wear resistance. It was concluded that the impact resistance of EP-PDMS coatings produced with a spraying time of 5 seconds, and the linear abrasion resistance of EP-PDMS coatings produced with a spraying time of 3 seconds were significantly better.

Conclusion: Superhydrophobic coatings, in addition to their many advantages, have the potential to be used in aircraft due to weak adhesion between the ice and the surface, delaying icing and reducing icing. The biggest obstacle to the use of superhydrophobic coatings in aircraft is that these coatings do not show the mechanical strength feature that can maintain their water repellency in outdoor conditions for a long time. In this study, coatings that can maintain their water-repellent properties in outdoor conditions were produced by differentiating the type and amount of siloxane, the amount of nanoparticles and the spraying time. Producing long-lasting water-repellent coatings with much higher mechanical strength properties will pave the way for the use of these passive structures in aircraft, in addition to the active anti-icing system.



Investigating Mechanical Strength of Epoxy/SiO₂ Superhydrophobic Coatings Prepared by Spray Coating Method

Ali Haydar GÜNEŞ^{1,*} Sinan FİDAN²

¹*Istanbul Bilgi Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, 34387, Şişli/İSTANBUL*

²*Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uçay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı, 41380, Kartepe/KOCAELİ*

Abstract

Superhydrophobic coatings, in addition to their many advantages, have the potential to be used in aircraft due to weak adhesion force formation between the ice and the surface, delaying and reducing icing. Today, although superhydrophobic surfaces can be produced using many methods, these surfaces cannot maintain their water-repellent properties for a long time under outdoor conditions. In this study, the relationship between the production parameters and mechanical abrasion resistance of superhydrophobic coatings prepared by the spray coating method was investigated. Two different mechanical strength tests were used to examine the usability of the coatings in outdoor conditions. The impact resistance of the surfaces was examined by the sand impact durability test and the abrasive wear resistance by the linear abrasion stability test. The mechanical strength of the surfaces showed significant differences depending on the production parameters. Epoxy/Polydimethylsiloxane/SiO₂ surfaces containing certain amounts of polydimethylsiloxane and SiO₂ nanoparticles exhibited superior water repellent and mechanical durability properties. Spraying time was a significant effect on the mechanical wear behavior of surfaces. Coatings with a short spraying time exhibited high abrasive wear resistance, while coatings produced with a long spraying time maintain their water-repellent properties for a long time under dynamic impacts.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 22.02.2022
Düzeltilme: 4.09.2022
Kabul: 10.10.2022

Keywords

Epoxy
Mechanical durability
Silica
Spray coating
Superhydrophobic

Anahtar Kelimeler

Epoksi
Mekanik dayanım
Silika
Sprey kaplama
Süperhidrofobik

Sprey Kaplama Yöntemi ile Üretilen Epoksi/SiO₂ Süperhidrofobik Kaplamaların Mekanik Dayanımlarının İncelenmesi

Öz

Süperhidrofobik kaplamalar sahip oldukları birçok avantajın yanı sıra buz ile yüzey arasında zayıf adezyon kuvveti oluşumu, buzlanmayı geciktirme ve buzlanmayı azaltma özellikleri nedeniyle hava araçlarında kullanım potansiyeli taşımaktadırlar. Günümüzde süperhidrofobik yüzeylerin çok sayıda yöntem kullanılarak üretiliyor olmasına karşın bu yüzeyler dış ortam koşullarında su iticilik özelliğini uzun süre koruyamamaktadır. Bu çalışmada, sprey kaplama yöntemi ile hazırlanan süperhidrofobik kaplamaların üretim parametreleri ile mekanik aşınma dayanımları arasındaki ilişki incelenmiştir. Kaplamaların dış ortam koşullarında kullanılabilirliğini incelemek amacıyla iki farklı mekanik dayanım testi kullanılmıştır. Yüzeylerin darbe dayanımı düşen kum aşınma testi, teğetsel aşınma dayanımı ise doğrusal abrazif aşınma testi ile incelenmiştir. Yüzeylerin mekanik dayanımının üretim parametrelerine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiği, belirli miktarlarda polidimetilsiloksan ve SiO₂ nanoparçacık içeren Epoksi/Polidimetilsiloksan/SiO₂ yüzeylerin üstün ıslanabilirlik ve mekanik dayanım özellikleri sergilediği görülmüştür. Püskürtme süresinin yüzeylerin mekanik aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, püskürtme süresi kısa kaplamaların yüksek abrazif aşınma dayanımı özelliği gösterdiği, uzun püskürtme süresi ile üretilen kaplamaların ise dinamik darbeler altında uzun süre su iticilik özelliklerini koruduğu tespit edilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğada süperhidrofobik özellik gösteren birçok canlı türü bulunmaktadır ve bu türler süperhidrofobik yüzeylerin geliştirilmesinde esin kaynağı olmuşlardır. Bu canlı türlerinin sahip olduğu mikro ve nano

yapıya sahip düşük enerjili biyolojik yüzeylerden esinlenilerek çok sayıda farklı yöntem ile süperhidrofobik yüzeylerin üretilmesine karşın insan yapımı bu yüzeylerin dış ortam koşullarında su iticilik özelliğini uzun süre koruyamadığı görülmektedir.

Süperhidrofobik kaplamaların spreyle kaplama yöntemi ile üretilmesi; farklı kimyasal yapıdaki, büyük ve düz olmayan yüzeylere uygulanabilme, düşük üretim ve uygulama maliyeti, spreyle kaplama yönteminin halihazırda kaplama endüstrisinde kullanılıyor olması, basit uygulanabilirlik, özel ve yüksek maliyetli ekipman gerektirmemesi, kısa süre içerisinde hazırlanabilme ve uygulanabilme kolaylığı, özel eğitilmiş personel gerektirmemesi, yarı saydam kaplamaların üretilmesine olanak vermesi ve son kullanıcı açısından kullanıcı dostu olması vb. avantajları nedeniyle çok sayıda araştırmacının konusu haline gelmiştir [1].

Süperhidrofobik yüzeyler sahip oldukları kendi kendini temizleme, korozyon önleme, buzlanmayı önleme, su-yağ ayırma, sürüklenme azaltma vb. özellikler nedeniyle geniş bir potansiyel kullanım alanına sahiptir. Süperhidrofobik kaplamalar; düşük aşınma dayanımı, buz giderme ve/veya buzlanma önleme çevrimlerinde yüzey mikro ve nano yapısının kademeli olarak hasar görmesinin sonucunda buzlanmayı önleme performansının azalması, nemli atmosfer ortamında suyun pürüzlü yapının içinde yoğunlaşması sonucunda buz ile yüzey arasındaki adezyon kuvvetinin çok büyük değerler alması (mekanik kilitleme) vb. kısıtlılıklara sahip olmasının yanı sıra sağladıkları avantajlar nedeniyle hava araçlarında buzlanmanın azaltılması ve geciktirilmesi amacıyla kullanım potansiyeli taşımaktadırlar [2][3]. Süperhidrofobik yüzeyler sınırlı mekanik aşınma dayanımına sahiptirler ve uzun süreli dayanım özelliği göstermezler. Bu önemli dezavantaj ticari ve endüstriyel olarak kullanımlarını kısıtlamaktadır.

Düşen kum aşınma testi, süperhidrofobik yüzey veya kaplamaların dinamik darbe dayanımını incelemek için yaygın olarak kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Kaplamanın, dış ortam koşullarında kullanılmaya uygun olup olmadığı ile ilgili bilgi sağlamaktadır. Genelde 45° açıyla yerleştirilen yüzeye belirli bir yükseklikten bırakılan mikrometre boyutlu parçacıkların yüzeye çarpması sonucunda yüzeyde meydana gelen değişimler incelenmektedir. Yüzeyin içine yerleşen parçacıklar yüzeyde kalarak yüzey kimyasının bozulmasına neden olmakta ya da darbelerin etkisi sonucunda yüzey dokusu kısmi olarak yok olmaktadır [4].

İki katı yüzey arasındaki sürtünme, süperhidrofobik kaplamaların günlük kullanımında ortaya çıkabilecek yaygın bir durumdur. Dolayısıyla bu aşınma biçimi kaplamanın mekanik dayanımını karakterize etmek için önemlidir. Aşınma dayanımı genellikle test edilen yüzeye teğetsel olarak hareket eden katı bir aşındırıcı ile doğrusal kayma abrazyonu kullanılarak ölçülmektedir. Bu formdaki aşınma; malzeme yüzeyine dik bir kuvvet vektörü ile yüzeye paralel hareket eden temas noktasından kaynaklanmaktadır. Teğetsel abrazyon aşınma, mekanik aşınmaya ve ardından malzeme kaybına neden olarak yüzey karakteristiğini değiştirmekte ve yüzeyin su iticiliğini yitirmesine yol açmaktadır [4].

Bu çalışmada; spreyle kaplama yöntemi ile üretilen epoksi/siloksan/silika nanoparçacık süperhidrofobik kaplamaların mekanik dayanımları düşen kum aşınma testi ve doğrusal abrazyon aşınma testi kullanılarak incelenmiş ve kaplamaların üretim parametreleri ile mekanik dayanımları arasındaki ilişki tartışılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Epoksi reçine; Kukdo Chemical'dan tedarik edilen, 184-190 g/eq epoksi eşdeğer ağırlığına ve 11500-13500 cps (25°C) viskoziteye sahip bisfenol a diglisidil eterdir. Epoksi reçinenin modifiye edilmesi amacıyla amino fonksiyonlu polisiloksan (PS) (TEGO Phobe 1505, Evonik Industries) ve vinil ile sonlandırılmış polidimetilsiloksan (PDMS) (Sylgard 184 Silikon Elastomer, DOW) olmak üzere iki farklı hidrofobik ajan kullanılmıştır. Epoksi kaplamalar izoforondiamin (IPA) (%99,8) (Baxxodur EC 201, BASF) sertleştirici kullanılarak kürlenmiştir. Kaplamalarda kullanılan nanoparçacık, 230-290 m²/g spesifik yüzey alanına ve 7-40 nm ortalama parçacık boyutuna sahip, yüzeyi heksametildisilan (HMDS) ile işlenmiş hidrofobik fumed silikadır (Aerosil R 812, Evonik Industries). Kaplamaların üretiminde Paasche Airbrush VL serisi boya tabancası, Einhell TC-AC 190/6/8 OF yağsız kompresör ile basınçlandırılmıştır. Epoksi/SiO₂ kaplamaların üretiminde kullanılan aseton (%99,5) Tekkim'den, etil asetat (%99,5) Emboy'dan tedarik edilmiştir.

2.1. Kaplamaların Hazırlanması (Preparation of Coatings)

15 ml çözücüye 2 g epoksi eklenmiş ve manyetik karıştırıcı ile 30 dakika karıştırılarak epoksinin aseton içerisinde çözünmesi sağlanmıştır. Çözücü-epoksi karışımına farklı miktarlarda (0,4 g, 0,6 g ve 0,8 g) PS ya da PDMS eklenmiş ve karışım 60 °C'de 75 dakika süre ile manyetik karıştırıcıda düşük devirde karıştırılarak epoksi reçine muamele edilmiştir. İşlem esnasında çözücünün buharlaşması nedeniyle, PS ya da PDMS ile muamele edilmiş epoksi reçineye 25 ml çözücü ilave edilmiştir. Karışıma farklı miktarlarda (1 g, 1,5 g ve 2 g) SiO₂ nanoparçacık eklenerek ultrasonik homojenizatör ile 20 kHz 50 Watt gücünde 60 dakika süre ile homojenize edilmiştir. Elde edilen homojen solüsyona 0,5 g IPA eklenmiş ve ultrasonik homojenizatör ile 15 dakika homojenleştirilmiştir. PDMS kullanılarak hazırlanan solüsyonlarda IPA ile eş zamanlı olarak, kullanılan PDMS miktarının %10'u oranında PDMS kürleme ajanı eklenmiştir. Epoksinin PS ile muamele edildiği kaplamaların hazırlanmasında çözücü olarak aseton kullanılmıştır. PDMS'nin aseton içerisinde çözünmemesi nedeniyle epoksi reçinenin PDMS ile muamele edildiği kaplamalar etil asetat kullanılarak üretilmiştir.

Ultrasonik homojenleştirme işlemi sonucunda solüsyonda oluşan hava kabarcıklarının yok olması için kısa bir süre bekletilen solüsyonlar, aseton ile silinerek temizlenmiş ve 70°C sıcaklıkta kurutulmuş 2,5x7,5 cm boyutundaki cam yüzeylere boya tabancası ile uygulanmıştır. Sprey kaplama işlemi 0,7 mm çaplı nozul kullanılarak 25 cm mesafeden, 90° açı ve 4 bar basınç ile yapılmıştır. 3 saniye ve 5 saniye olmak üzere iki farklı uygulama süresi belirlenmiştir. Mesafenin ve açının değişiklik göstermemesi amacıyla cam yüzeylerin ve boya tabancasının sabitlenebileceği ahşap bir stant hazırlanmış ve kullanılmıştır. Kaplanmış cam yüzeyler 70 °C'de 12 saat kürlenmiştir.

Sonuç olarak, epoksinin PS ve PDMS ile muamele edildiği iki farklı set kaplama hazırlanmıştır. Her bir sette; siloksan miktarı, nanoparçacık miktarı ve uygulama süresi farklılaştırılarak toplamda 36 farklı kaplama üretilmiştir. Siloksan miktarının epoksiye göre ağırlıkça oranı %20, %40 ve %60; nanoparçacık miktarının epoksiye göre ağırlıkça oranı ise %50, %75 ve %100'dür.

Üretilen kaplamaların kodlanmasında kullanılan sistem aşağıda verilmiştir:

EP₂/PS_{0,4}/NP_{1,5}/3 ya da EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/5

Kaplamadaki epoksi (EP), polisiloksan (PS), polidimetilsiloksan (PDMS) ve nanoparçacık (NP) miktarı alt simgelerle gösterilmiştir. Kodlamanın sonundaki rakam ise uygulama süresini ifade etmektedir.

2.2. Temas Açısı ve Kayma Açısı Ölçümleri (Contact Angle and Sliding Angle Measurements)

Kaplamaların temas açısı ölçümleri ev yapımı temas açısı ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. 10 µl mikrolitre şırınga kullanılarak numune yüzeyine 10 µl saf su bırakılmış ve her numunenin üç farklı noktasından görüntü alınmıştır. Görüntüler, ImageJ ve "DropSnake and LB_ADSA" eklentisinin LB_ADSA modülü ile işlenmiş ve statik temas açısı değerleri elde edilmiştir [5].

Numunelerin kayma açılarının ölçülebilmesi amacıyla ev yapımı basit bir sistem kullanılmıştır. Numuneler, bir kenarı yatay bir düzleme sabitlenmiş, sabitlenmiş bu kenarı etrafından döndürülebilen bir yüzey üzerine yerleştirilmiş ve numunelerin yüzeyine 10 µl saf su bırakılmıştır. Levhanın sabitlenmemiş olan kenarı, numune üzerindeki su damlasının kaymaya başladığı eğime kadar düşük hızla yukarı doğru çekilerek levhanın eğimi kademeli olarak artırılmıştır. Yüzey eğimi, döndürülen yüzeye yatay pozisyonda yerleştirilen bir akıllı telefon ve yüzey eğimini 0,1° hassasiyetle ölçmeye olanak sağlayan Clinometer isimli yazılım kullanılarak ölçülmüştür.

2.3. Yüzey Karakterizasyonu (Surface Characterization)

Kaplamalar Nanovea PS50 temassız üç boyutlu profilometre ile karakterize edilmiştir. Her bir numunenin yüzeyinde 1 x 1 mm² büyüklüğündeki bir alan 5µm hassasiyette taranmış ve elde edilen veriler DigitalSurf Mountains Software 6 yazılımı ile yüzey topoğrafı üretilmiştir. Mekanik kararlılık testlerinin, numunelerin yüzey yapısında yarattığı değişimin incelenmesi amacıyla mekanik kararlılık testlerinin ardından numune yüzeyleri profilometre ile tekrar taranmıştır.

2.4. Düşen Kum Aşınma Testi (Sand Impact Abrasion Test)

Düşen kum aşınma testi, 60 meş parçacık boyutuna sahip alümina parçacık kullanılarak süperhidrofobik özellik gösteren kaplamalara uygulanmıştır. 50 gram alümina parçacık 40 cm yükseklikten, 45° açı ile yerleştirilmiş olan numunelerin yüzeyine bırakılmış ve parçacıkların neden olduğu aşınma sonucunda kaplamaların hidrofobik özelliklerindeki değişimin incelenmesi amacıyla statik temas açısı ve kayma açısı ölçümleri yapılmıştır. Her ölçüm işleminden önce numunelerin yüzeyi basınçlı hava ile temizlenmiştir. Su temas açısı 150°'nin altına düşene kadar test ve ölçüm işlemleri tekrarlanmıştır.

2.5. Doğrusal Abrazif Aşınma Testi (Linear Abrasion Test)

Doğrusal abrazif aşınma testi, 1000 gritlik SiC zımpara ve 200 gram kurşun ağırlık kullanılarak statik temas açısı 150°'den büyük ve kayma açısı 10°'den küçük olan kaplamalara uygulanmıştır. Öncelikle zımpara aşındırıcı yüzeyi üstte olacak şekilde düz bir zemin üzerine yerleştirilmiştir. Numunelerin kaplanmış yüzeyleri zımpara ile temas edecek şekilde zımparanın üzerine konumlandırılmış, ardından 200 gramlık ağırlık numunenin üzerine yerleştirilmiştir. Numuneler, bu ağırlık altında 10 cm ileri ve 10 cm geri kaydırılarak kaplamaların aşınması sağlanmış ve işlem 3 kez tekrarlandıktan sonra numune yüzeyleri basınçlı hava ile temizlenerek statik temas açısı ve kayma açısı ölçümleri yapılmıştır. Bu işlem, su temas açısı 150°'nin altına düşene kadar tekrarlanmıştır. Zımpara yüzeyindeki kalıntıların temizlenmesi, her aşındırma işleminden sonra basınçlı hava ile sağlanmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR (EXPERIMENTAL FINDINGS)

Epoksi yapısı gereği hidrofilik özellik göstermektedir. Epoksi reçinenin iki farklı siloksan ile muamele edilmesi ve SiO₂ nanoparçacık ile yüzey pürüzlülüğünün sağlanması sonucunda kaplamaların tamamında 150°'nin üzerinde statik su temas açıları elde edilmiştir. Kayma açısı 10°'nin üzerinde olan iki kaplama dışındaki bütün kaplamalar süperhidrofobik özellik göstermektedir. Bu bölümde verilen temas açısı değerleri, aynı kompozisyona sahip iki farklı numunenin üç farklı noktada yapılan toplam altı ölçümün aritmetik ortalaması olarak verilmiştir. Kayma açısı ise yine aynı kompozisyona sahip iki numuneden elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak elde edilmiştir. Mekanik dayanım testleri sırasında aşındırılan bölgenin yüzey alanının küçüklüğü nedeniyle numune üzerinde işaretlenen ve aşınmanın en yoğun olarak gözlemlendiği yalnızca bir noktada temas açısı ve kayma açısı ölçümleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında üretilen kaplamaların ortalama temas açısı, ortalama kayma açısı ve standart sapma değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Su temas açısı, nanoparçacık yoğunluğundaki artışa bağlı olarak önce önemli oranda artış göstermekte, ardından ise siloksan türüne ve miktarına göre ya artış oranı azalmakta ya da temas açısı küçülmektedir. EP2/PS0,8/NP1/3 ve EP2/PS0,8/NP1/5 kodlu kaplamalar, kayma açılarının 10°'nin üzerinde olması nedeniyle süperhidrofobik özellik göstermemiştir. Bu kaplamalar dışındaki bütün kaplamalarda 10°'nin altında kayma açıları kayıt altına alınırken bütün kaplamalarda en küçük kayma açısı değerleri 1,5 gram SiO₂ içeren kaplamalarda elde edilmiştir.

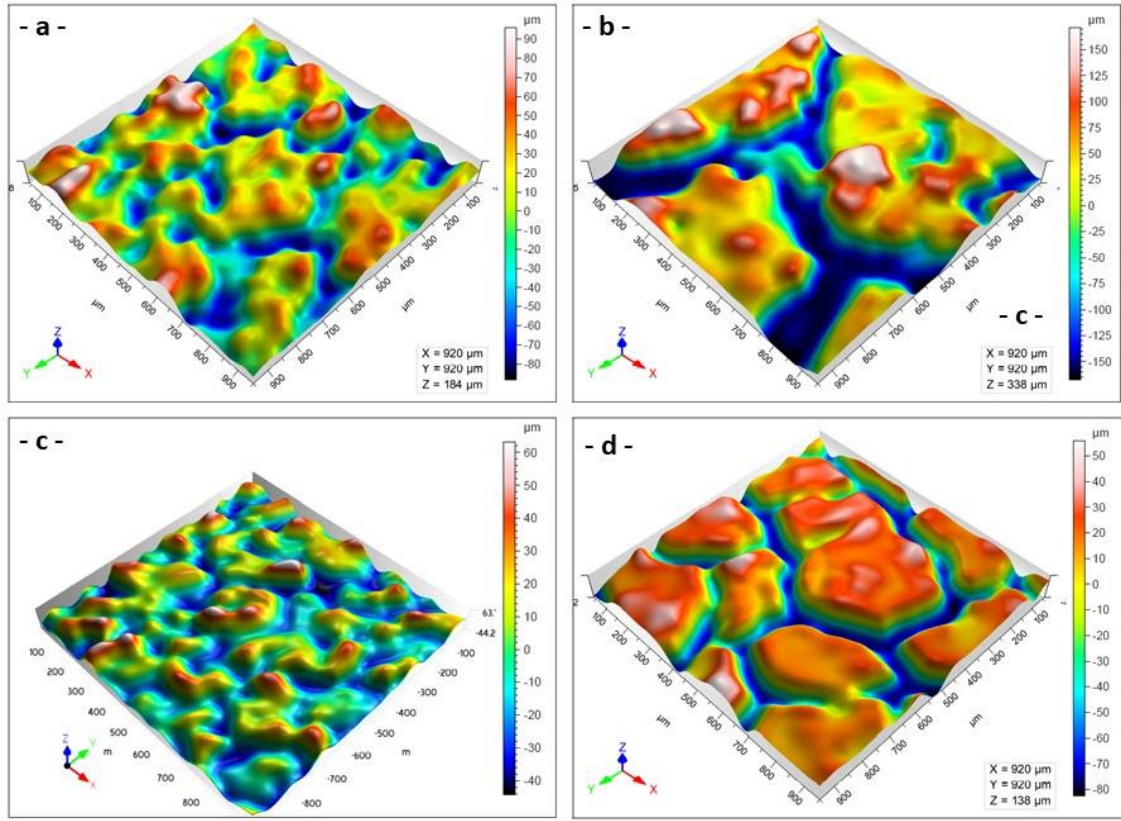
Yüksek miktarda nanoparçacık ve siloksan içeren kaplamalarda gözle görülebilen büyüklükte mikro çatlakların ortaya çıktığı ve kaplamanın cam yüzeye yapışmadığı gözlemlenmiştir. Bu mikro çatlaklar epoksinin gevrek bir yapıya sahip olmasından ve çözücünün buharlaşması esnasında kaplamanın maruz kaldığı stresten kaynaklanmaktadır [6]. Ek olarak, kaplamada gözlemlenen çatlakların nanoparçacık yoğunluğuna bağlı olduğunu bildiren çalışmalar bulunmaktadır [7]. Çatlaklar, pürüzlülük rolü oynayarak yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olurken, su damlasının bu çatlakların içine girmesi kaplamaların su iticilik performansını olumsuz etkilemektedir.

Yüksek miktarda nanoparçacık ve siloksan içeren kaplamalarda uygulama süresindeki artışla birlikte kaplama yüzeyindeki çatlaklar derinleşmiş ve kaplamaların yüzeye yapışmama sorunu artmıştır. Uygulama süresindeki artış kaplamaların yüzey morfolojilerinde değişime neden olmuştur. Yüzey pürüzlülüğü sağlayan mikro yapıların yerini milimetre mertebelerinde boyutlara ulaşan yapılar ve bu yapıları birbirinden ayıran derin çatlaklar almıştır. Kaplamanın mekanik dayanım performansını da olumsuz etkileyen bu morfolojik değişim yüksek miktarda nanoparçacık ve siloksan içeren kaplamalarda daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.

Tablo 1. Kaplamaların SiO₂ yoğunluğu, ortalama temas açısı, ortalama kayma açısı ve standart sapma değerleri (Ort. TA: Ortalama temas açısı, SS_{TA}: Temas açısı standart sapma değeri, Ort. KA: Ortalama kayma açısı, SS_{KA}: Kayma açısı standart sapma değeri, *: Su damlasının yüzeyde sabit durmaması nedeniyle kayma açısı değerinin ölçülemediği ve “<1°” şeklinde gösterildiği numunelerde standart sapma değerleri hesaplanmamıştır.)

| Numune | SiO ₂ Yoğunluğu | 3 saniye uygulama süresi | | | | 5 saniye uygulama süresi | | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|------------------|------------|------------------|--------------------------|------------------|------------|------------------|
| | | Ort. TA | SS _{TA} | Ort. KA | SS _{KA} | Ort. KA | SS _{TA} | Ort. KA | SS _{KA} |
| EP ₂ /PS _{0,4} /NP ₁ | %41,6 | 154,1° | 2,03 | 6,4° | 0,57 | 154,5° | 2,46 | 5,5° | 0,99 |
| EP ₂ /PS _{0,4} /NP _{1,5} | %62,5 | 159,9° | 2,10 | 0,9° | 0,21 | 161,6° | 3,54 | 2,3° | 0,35 |
| EP ₂ /PS _{0,4} /NP ₂ | %83,3 | 162,1° | 3,23 | 3,0° | 1,13 | 160,2° | 3,24 | 7,5° | 0,71 |
| EP ₂ /PS _{0,6} /NP ₁ | %38,5 | 155,9° | 2,19 | 5,9° | 0,14 | 154,8° | 2,08 | 5,9° | 0,49 |
| EP ₂ /PS _{0,6} /NP _{1,5} | %57,6 | 163,8° | 2,78 | 2,5° | 0,07 | 161,4° | 3,41 | 2,0° | 0,42 |
| EP ₂ /PS _{0,6} /NP ₂ | %76,9 | 162,0° | 2,54 | 3,2° | 0,21 | 161,5° | 3,62 | 5,6° | 0,85 |
| EP ₂ /PS _{0,8} /NP ₁ | %35,7 | 153,8° | 2,86 | 23,4° | 0,85 | 156,0° | 1,51 | 13,4° | 0,85 |
| EP ₂ /PS _{0,8} /NP _{1,5} | %53,6 | 165,6° | 3,63 | 2,3° | 0,21 | 164,1° | 3,06 | 2,7° | 0,21 |
| EP ₂ /PS _{0,8} /NP ₂ | %71,4 | 162,0° | 2,01 | 3,8° | 0,28 | 161,8° | 3,57 | 6,5° | 0,00 |
| EP ₂ /PDMS _{0,4} /NP ₁ | %41,6 | 163,1° | 3,94 | 2,6° | 0,21 | 158,4° | 3,98 | 2,4° | 0,85 |
| EP ₂ /PDMS _{0,4} /NP _{1,5} | %62,5 | 170,1° | 3,84 | <1° | * | 163,8° | 3,50 | <1° | * |
| EP ₂ /PDMS _{0,4} /NP ₂ | %83,3 | 166,6° | 3,56 | <1° | * | 163,5° | 3,50 | 2,7° | 0,42 |
| EP ₂ /PDMS _{0,6} /NP ₁ | %38,5 | 165,2° | 3,52 | 4,8° | 1,70 | 157,2° | 3,57 | 4,9° | 1,20 |
| EP ₂ /PDMS _{0,6} /NP _{1,5} | %57,6 | 166,7° | 3,06 | <1° | * | 163,6° | 2,85 | <1° | * |
| EP ₂ /PDMS _{0,6} /NP ₂ | %76,9 | 165,8° | 2,66 | 2,7° | 0,28 | 164,6° | 2,24 | 1,8° | 0,49 |
| EP ₂ /PDMS _{0,8} /NP ₁ | %35,7 | 164,7° | 2,01 | 1,8° | 1,06 | 161,4° | 1,76 | 2,3° | 0,35 |
| EP ₂ /PDMS _{0,8} /NP _{1,5} | %53,6 | 162,3° | 1,75 | <1° | * | 161,7° | 1,75 | <1° | * |
| EP ₂ /PDMS _{0,8} /NP ₂ | %71,4 | 161,6° | 2,00 | 1,9° | 0,35 | 161,5° | 2,32 | 2,7° | 0,49 |

Sprey kaplama yöntemi ile üretilen süperhidrofobik kaplamalarda, uzun uygulama sürelerinin kaplamanın performansını önemli ölçüde düşürdüğü, temas açısının belirli bir uygulama süresinden sonra azalma yönünde eğilim gösterdiği, uygulama süresinin temas açısı üzerindeki bu etkisinin nanoparçacık yoğunluğundan etkilendiği ve yüksek uygulama sürelerinde kaplamanın yüzeye yapışmadığı yönünde benzer sonuçlar içeren çalışmalar bulunmaktadır [8]. Uygulama süresine bağlı olarak yüzey morfolojisindeki değişim Şekil 1’de gösterilmiştir. Yüksek miktarda PS ya da PDMS ve nanoparçacık içeren ve 5 saniye uygulama süresi ile hazırlanmış EP-PS ve EP-PDMS kaplamaların yüzey morfolojilerindeki benzerlik dikkat çekmektedir.



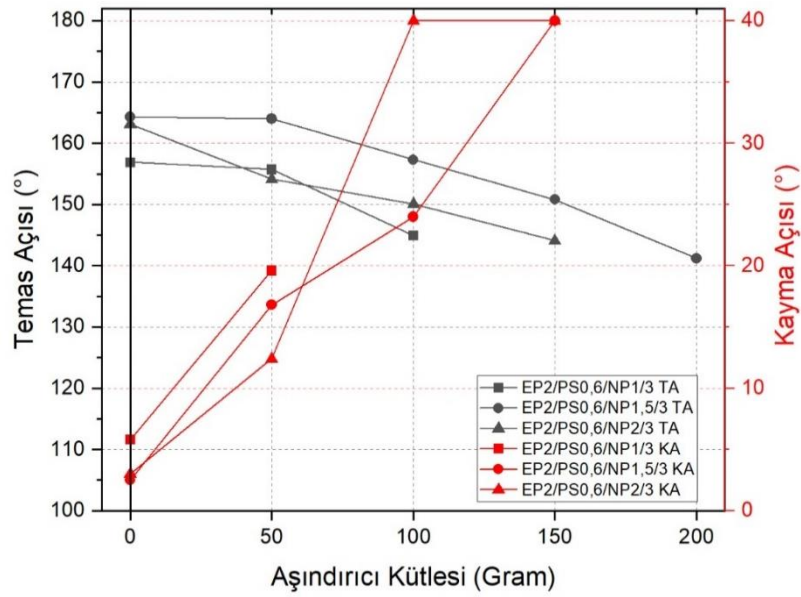
Şekil 1. Uygulama süresindeki artışın yüzey morfolojisinde neden olduğu değişim
a) $EP_2/PS_{0,8}/NP_2/3$ b) $EP_2/PS_{0,8}/NP_2/5$ c) $EP_2/PDMS_{0,8}/NP_2/3$ d) $EP_2/PDMS_{0,8}/NP_2/5$

3.1. Dinamik Darbe Dayanımı (Dynamic Impact Resistance)

Bu çalışma kapsamında üretilen kaplamaların dinamik darbe dayanımları düşen kum aşınma testi ile incelenmiştir. Kaplamalar 50 gram aşındırıcı kullanılarak aşındırıldıktan sonra temas ve kayma açıları ölçülmüş ve 150° 'nin altında temas açısı ölçülene kadar bu işlem tekrarlanmıştır. Tekrar eden her bir işlem bir “çevrim” olarak adlandırılmıştır. Teknik kısıtlılıklar nedeniyle 40° 'nin üzerindeki kayma açıları ölçülemediği olup 40° - 90° arasındaki kayma açıları grafiklerde 40° olarak gösterilmiştir. Kayma açısı grafiğinin sonlandığı değer ise su damlasının kaplama yüzeyine yapıştığını ve yüzeyde kaymadığını göstermektedir.

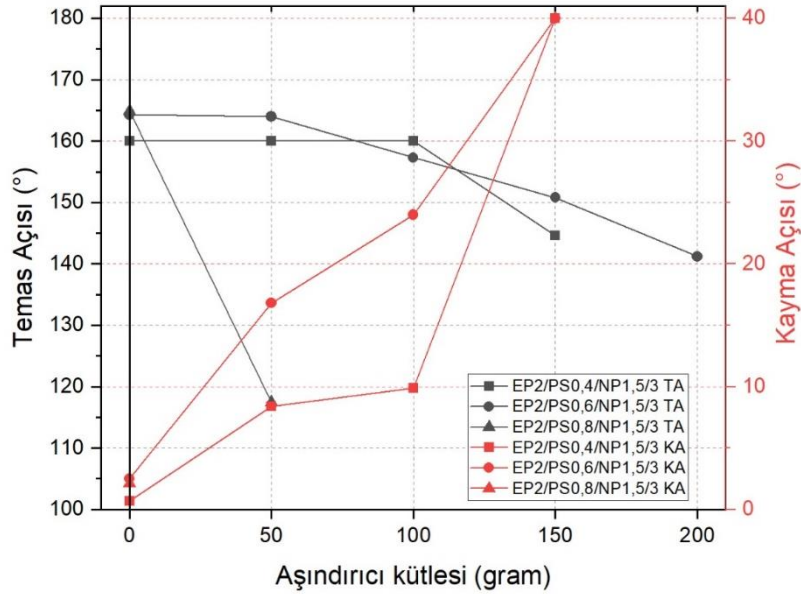
3.1.1. Epoksi/PS/SiO₂ Kaplamalar (Epoxy/PS/SiO₂ Coatings)

Şekil 2’de 0,6 gram polisiloksan içeren ve 3 saniye uygulama süresi ile üretilmiş olan EP-PS kaplamaların aşındırıcı kütlelerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim verilmiştir. İlk çevrimin sonunda $EP_2/PS_{0,4}/NP_1/3$ ve $EP_2/PS_{0,4}/NP_2/3$ kodlu kaplamaların temas açıları belirgin bir düşüş ortaya çıkarken her üç kaplamanın da kayma açısı 10° 'nin üzerine çıkmıştır. $EP_2/PS_{0,4}/NP_{1,5}/3$ kodlu kaplama, Şekil 2’de gösterilen kaplamalar arasında en yüksek dayanıma sahip kaplamadır. 3. çevrimin sonunda kayma açısının 40° 'nin üzerine çıkmasına karşın 150° 'nin üzerinde su temas açısına sahip tek kaplamanın bu kaplama olduğu görülmektedir.



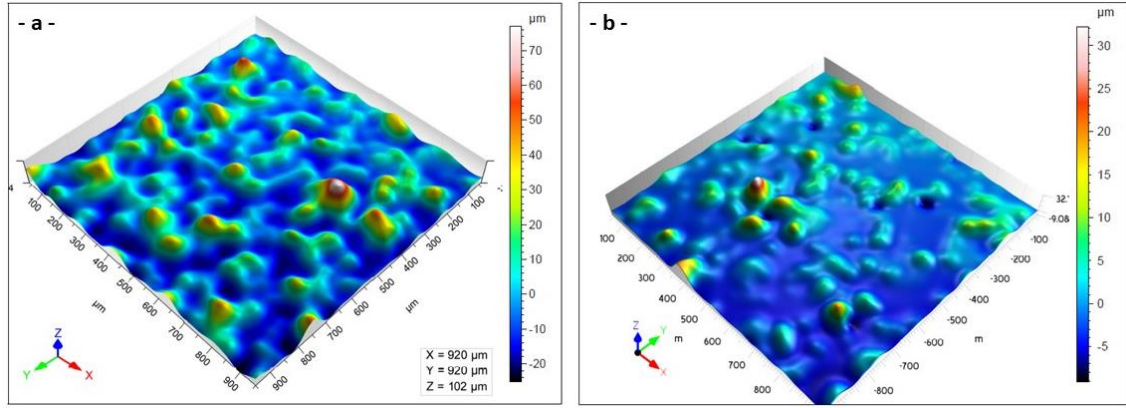
Şekil 2. 0,6 gram PS içeren EP-PS kaplamaların aşındırıcı kütlesine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

Yüksek miktarda polisiloksan içeren EP₂/PS_{0,8}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın temas açısındaki ani düşüş ve su damlasının yüzeye yapışması nedeniyle kayma açısının ölçülememiş olması dikkat çekmektedir. Bu kaplamada, ilk çevrimin sonunda kaplama kalınlığı ve kaplama yüzeyindeki mikro yapıların yoğunluğu önemli oranda azalmış ve yüzeyde geniş pürüzsüz alanlar ortaya çıkmıştır. Aşınma sonucunda yüzey morfolojisinden meydana gelen değişim Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3. 1,5 gram SiO₂ nanoparçacık içeren EP-PS kaplamaların aşındırıcı kütlesine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

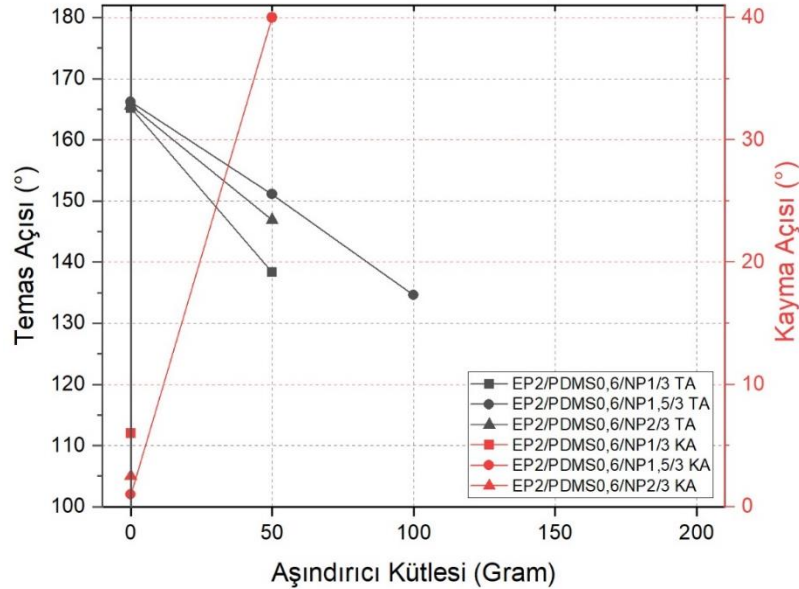
EP₂/PS_{0,4}/NP_{1,5}/3 ve EP₂/PS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamalarda ise 3. çevrimin sonunda temas açıları 150°'nin altına düşmüş ve kayma açıları 40°'nin üzerine çıkmıştır. 3 saniye uygulama süresi ile üretilen EP-PS kaplamalar içerisinde dinamik darbe dayanımı en iyi olan kaplamanın EP₂/PS_{0,4}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplama olduğu görülmektedir.



Şekil 4. EP₂/PS_{0,8}/NP_{1,5}/3 kodlu numenin aşınma öncesi ve sonrası üç boyutlu yüzey topoğrafı
a) Aşınma öncesi b) Aşınma sonrası

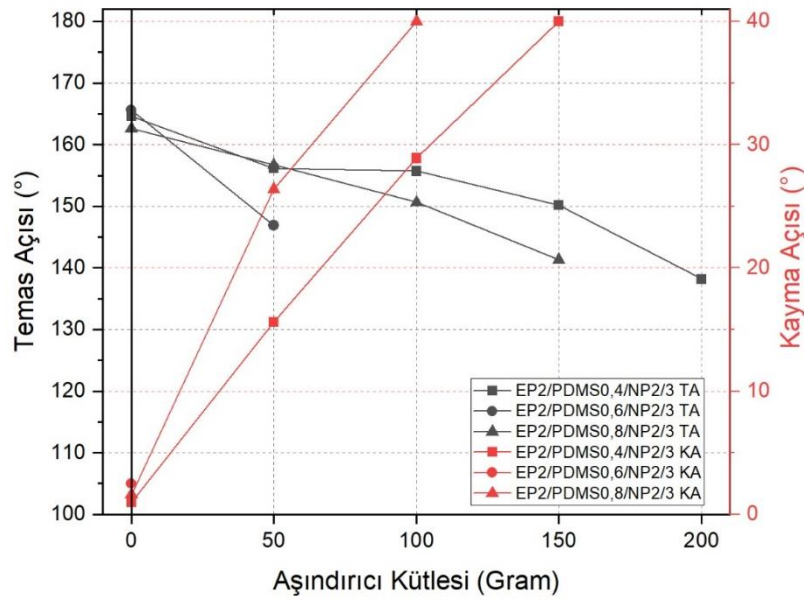
EP-PS kaplamaların önemli bir kısmı dinamik darbelere direnç gösterememiş olup 50 gram veya 100 gram aşındırıcı parçacığa maruz kaldığında yüzeyden tamamen soyulmuştur. Yüksek miktarda nanoparçacık içeren kaplamaların dinamik darbe dayanımları oldukça düşük olduğu görülmektedir. En iyi sonuç; 1,5 gram nanoparçacık ile 0,4 ve 0,6 gram polisiloksan içeren kaplamalarda elde edilmiştir. Bu kaplamalarda, 150 gram aşındırıcı parçacığa maruz kaldıktan sonra 150°'nin altında temas açıları ölçülmüştür. Uygulama süresi EP-PS kaplamaların dinamik darbe dayanımı üzerinde önemli bir rol oynamamıştır.

3.1.2. Epoksi/PDMS/SiO₂ Kaplamalar (Epoxy/PDMS/SiO₂ Coatings)



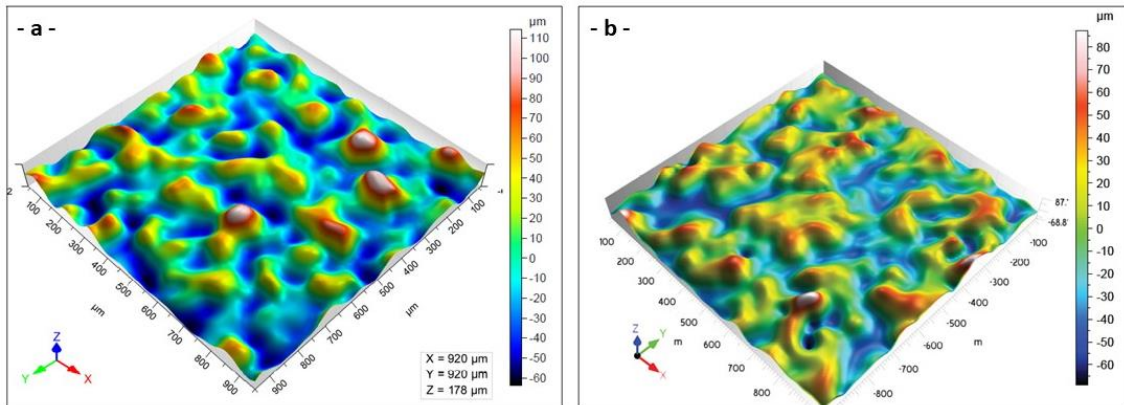
Şekil 5. 0,6 gram PDMS içeren EP-PDMS kaplamaların aşındırıcı kütlelerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

Şekil 5'te 3 saniye uygulama süresi ile üretilmiş 0,6 gram PDMS içeren, Şekil 6'da ise yine 3 saniye uygulama süresi ile üretilmiş 2 gram nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların dinamik darbelere direnç gösteremediği ve ilk çevrimlerden itibaren su iticilik özelliklerini yitirdiği görülmektedir. Bu kaplamalarda ilk aşındırma çevrimlerinin sonunda su temas açıları 150°'nin altına düşmüştür ve dinamik darbe dayanımları arasında önemli farklılıklar tespit edilmemiştir.

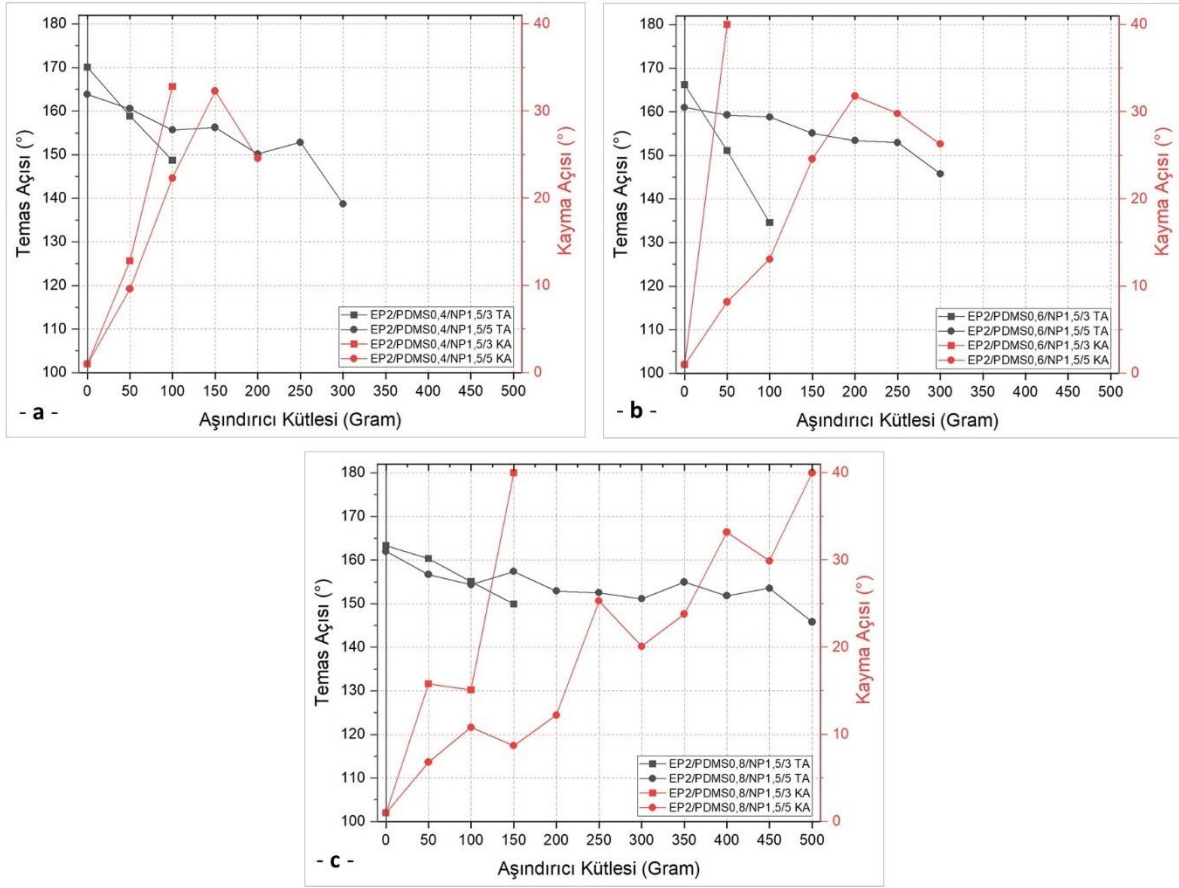


Şekil 6. 2 gram nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların aşındırıcı kütlesine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

EP-PDMS kaplamalarda uygulama süresi kaplamanın dinamik darbe dayanımı üzerinde önemli bir role sahiptir. En iyi sonuçların elde edildiği 1,5 gram nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların temas ve kayma açılarındaki değişim aşındırıcı miktarına bağlı olarak Şekil 7’de verilmiştir. 5 saniye uygulama süresi ile üretilen kaplamaların dinamik darbe dayanımının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Dikkat çeken önemli bir nokta ise 3 saniye uygulama süresi ile üretilen kaplamaların daha büyük temas açısına sahip olmalarına rağmen dinamik darbe testinde temas açısında gözlemlenen ani düşüştür. Bu sonuç, ıslanabilirlik parametreleri ile dinamik darbe dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmadığına işaret etmektedir. En yüksek darbe dayanımı EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}/5 kodlu kaplamada elde edilmiştir. Bu kaplamada, 450 gram aşındırıcı parçacığın neden olduğu aşınma sonrasında 153,5° teması açısı ve ~ 30° kayma açısı ölçülmüştür. Aşınma sonucunda bu kaplamada meydana gelen morfolojik değişim ise Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}/5 kodlu kaplamanın aşınma sonucunda yüzeyinde meydana gelen morfolojik değişim a) aşınma öncesi b) aşınma sonrası



Şekil 7. EP-PDMS kaplamaların dinamik darbe dayanımının uygulama süresine bağlı olarak değişimi
a) EP₂/PDMS_{0,4}/NP_{1,5} b) EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5} c) EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}

EP-PS kaplamaların dinamik darbe dayanımının oldukça düşük olduğu ve üretim parametrelerinin kaplamaların dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynamadığı görülmüştür. EP-PS kaplamaların aksine EP-PDMS kaplamalarda üretim parametrelerinin dinamik darbe dayanımı üzerinde önemli bir etki göstermiştir. Kaplamaların önemli bir kısmında uygulama süresindeki artış kaplamaların dayanımında belirgin bir artışa neden olmuştur. 1,5 gram nanoparçacık içeren kaplamaların dayanımı belirgin bir biçimde daha yüksektir. En yüksek dinamik darbe dayanımının elde edildiği, 5 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 1,5 gram nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamalarda dinamik darbe dayanımının PDMS miktarındaki artışla birlikte arttığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmada üretilen tüm kaplamalar arasında en yüksek darbe dayanımı EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}/5 kodlu kaplamada elde edilmiştir. Bu kaplama, Tablo 2’de verilen, epoksi reçine kullanılarak sprey kaplama yöntemi ile üretilen ve mekanik dayanımları düşen kum testi ile ölçülen çalışmaların büyük bölümünden daha iyi dinamik darbe dayanım özelliği sergilemiştir.

Tablo 2. Epoksi reçine kullanılarak sprey kaplama yöntemi ile üretilen ve mekanik dayanımı düşen kum testi ile ölçülen süperhidrofobik kaplamalar ve test parametreleri

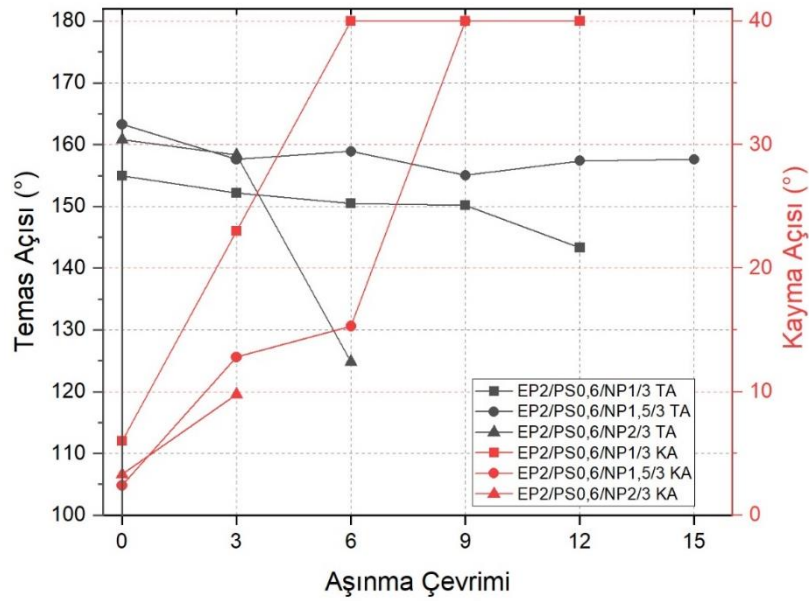
| Matris ve nanoparçacık | Yüzey | Aşındırıcı parçacık boyutu ve türü | Yüzey eğimi ve yükseklik | Aşındırıcı kütlesi ya da aşındırma süresi | Sonuç: Temas açısı (TA) ve kayma açısındaki (KA) değişim | Ref. |
|--|---------------------|--|--------------------------|---|--|------|
| Epoksi Reçine Halloysit nanotüp | Paslanmaz çelik meş | 180–280 µm çaplı parçacık | 45° 18 cm | 25 g 30 g | 25 g için TA>150° 30 g için TA=147° ve su-yağ ayırma verimliliği %98,4 | [9] |
| Florosilikon reçine/epoksi reçine karışımı SiO ₂ | Cam İzolatör | 80-200 µm çaplı kum tanesi | 45° 30 cm | 10 g | TA=153,2° ± 2° | [10] |
| Epoksi reçine Al ₂ O ₃ | Alüminyum | 355-710 µm çaplı SiO ₂ parçacık | 45° 30 cm | 1100 g (20 gram, 55 çevrim) | 1100 g (20 g, 55 çevrim) sonunda hala su itici özelliğini korumuştur. | [11] |
| Epoksi SiO ₂ NP/ Polistiren (çekirdek/kabuk) | Cam | 300-1000 mm çaplı kum tanesi | 45° 40 cm | 500 gram (50 g, 10 çevrim) | TA>160° TAH<10° | [12] |
| Epoksi reçine SiO ₂ | Çelik | 0,5-1,0 mm | 45° 100 cm | 80 g 60 s | TA=151° ve KA=5° | [13] |

3.2. Doğrusal Abrazif Aşınma Dayanımı (Linear Abrasive Wear Resistance)

Doğrusal abrazif aşınma testinde, kaplamalar 200 gram ağırlık altında 1000 gritlik SiC zımpara ile aşındırılmıştır. Numuneler, zımpara üzerinden 10 cm ileri ve 10 cm geri kaydırılarak yüzeyin aşınması sağlanmış ve bu işlem 3 kez tekrarlandıktan sonra temas ve kayma açıları ölçülmüştür. Bu aşındırma işlemi “çevrim” olarak adlandırılmış ve 150°’nin altında temas açısı ölçülene değin tekrarlanmıştır. Düşen kum testinde olduğu gibi; 40°’nin üzerindeki kayma açıları ölçülemez olup 40-90° arasındaki kayma açıları grafiklerde 40° olarak gösterilmiştir. Kayma açısı grafiğinin sonlandığı değer ise su damlasının kaplama yüzeyine yapıştığını ve yüzeyde kaymadığını göstermektedir.

3.2.1. Epoksi/PS/SiO₂ Kaplamalar (Epoxy/PS/SiO₂ Coatings)

Şekil 9’de 3 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 0,6 gram PS içeren EP-PS kaplamaların temas ve kayma açılarındaki değişim aşınma çevrimlerine bağlı olarak verilmiştir. EP₂/PS_{0,6}/NP₂/3 kodlu kaplamanın aşınma dayanımının oldukça zayıf olduğu görülmektedir. 6. çevrimin sonunda temas açısı yaklaşık 125°’ye düşmüş ve suyun yüzeye yapışması sonucunda kayma açısı ölçülemez. 2 gram nanoparçacık içeren kaplamalarda PS miktarındaki artışla birlikte kaplama yüzeyinde mikro çatlakların oluştuğu ve kaplamanın yüzeye yapışmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kaplamanın abrazif aşınma dayanımını olumsuz etkilemiştir.

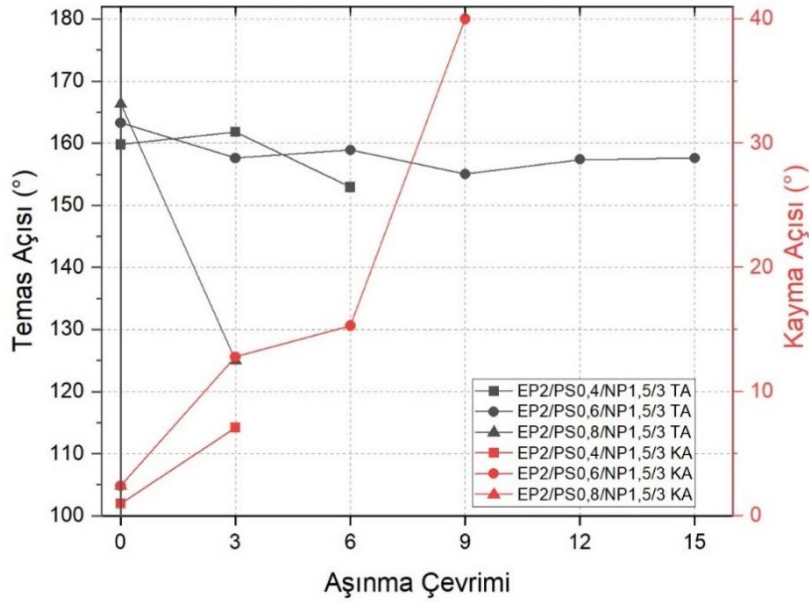


Şekil 9. 0,6 gram PS içeren EP-PS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

EP₂/PS_{0,6}/NP_{1/3} kodlu kaplamada ise 6. çevrimin sonunda kayma açısı 40°'nin üzerine çıkmış ve 12. çevrimin sonuna kadar 40-90° arasında kayma açısı ölçülmüştür. Bu kaplamada 12. çevrimin sonunda temas açısının 150°'nin altına düştüğü ve yaklaşık 143° temas açısı ölçüldüğü görülmektedir. EP₂/PS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplama, 3 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 0,6 g PS içeren kaplamalar arasında en yüksek aşınma dayanımına sahiptir. 9. çevrimin sonunda kayma açısının 40°'nin üzerine çıkmasına karşın temas açısı 15 aşınma çevrimi boyunca 150°'nin üzerinde kalmıştır. Bu çevrimin ardından kaplama yüzeyden tamamen soyulduğu için temas açısı ölçülmemiştir. 1,5 gram nanoparçacık içeren EP-PS kaplamalar, aynı zamanda EP-PS kaplamalar içerisinde su iticilik performansı en yüksek olan kaplamalardır.

Şekil 10'da 1,5 gram nanoparçacık içeren EP-PS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim verilmiştir. Farklı miktarlarda nanoparçacık içeren bu kaplamalar içerisinde de en yüksek abrazyon aşınma dayanımına sahip olan kaplamanın EP₂/PS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplama olduğu görülmektedir. Uygulama süresi ise EP-PS kaplamaların abrazyon aşınma dayanımı önemli bir rol oynamamıştır.

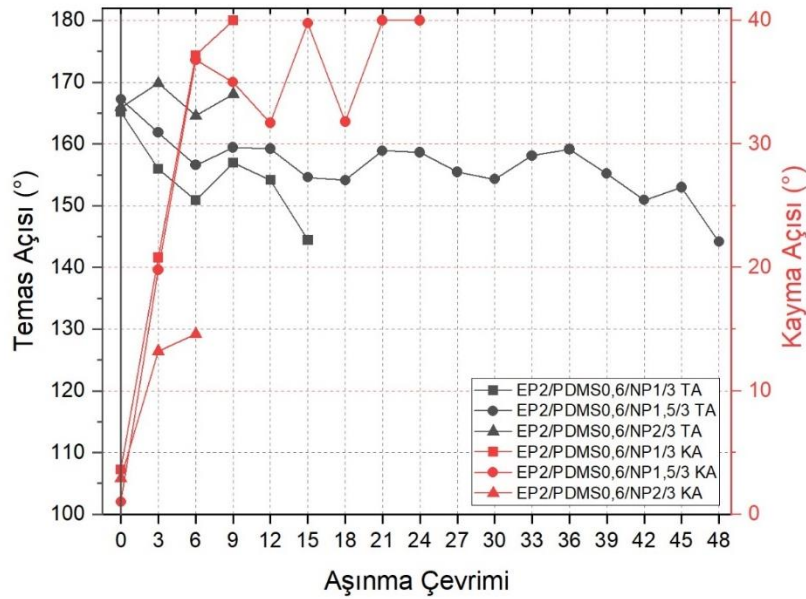
EP-PS kaplamaların önemli bir bölümü teğetsel yüklere karşı dayanım gösterememiş ve ilk 3 aşınma çevrimi sonunda yüzeyden tamamen veya büyük oranda soyulmuştur. Bu kaplamalar içerisinde en yüksek aşınma dayanımı 0,6 gram PS ve 1,5 gram SiO₂ nanoparçacık içeren EP₂/PS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada elde edilmiştir. Bu kaplamada 15. aşınma çevrimi (200 cm) sonunda ölçülen temas açısı 157,6°'dir.



Şekil 10. 1,5 gram SiO_2 nanoparçacık içeren EP-PS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

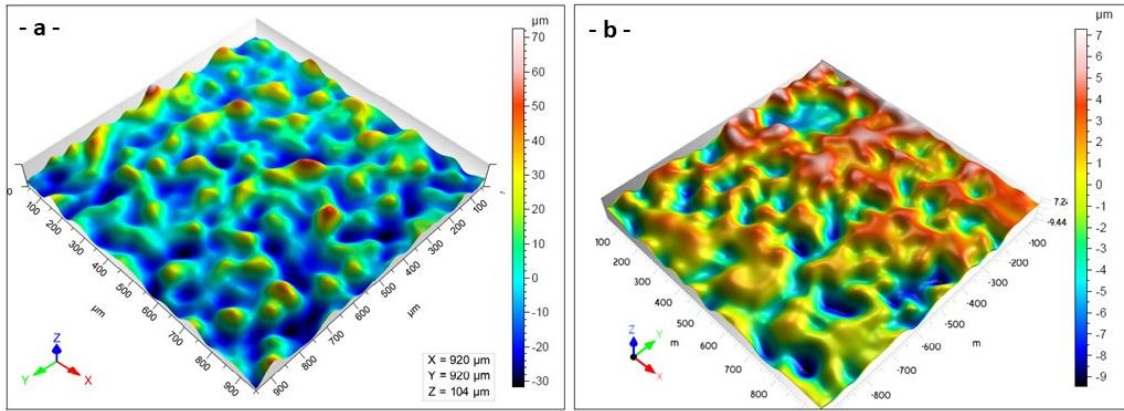
3.2.2. Epoksi/PDMS/ SiO_2 Kaplamalar (Epoxy/PDMS/ SiO_2 Coatings)

Şekil 11’de 3 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 0,6 gram PDMS içeren EP-PDMS kaplamaların temas ve kayma açılarındaki değişim aşınma çevrimlerine bağlı olarak verilmiştir. Nanoparçacık miktarı, EP-PDMS kaplamaların aşınma dayanımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. 1 ve 2 gram nanoparçacık içeren kaplamalarda ilk çevrimlerin sonunda temas açısı 150° ’nin altına düşerken, EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın temas ve kayma açıları incelendiğinde; kayma açısının 21. çevrime kadar 40° ’nin altında bir değer aldığı, temas açısının ise 48. çevrimin sonunda 150° ’nin altında düşerek $144,1^\circ$ olduğu görülmektedir.



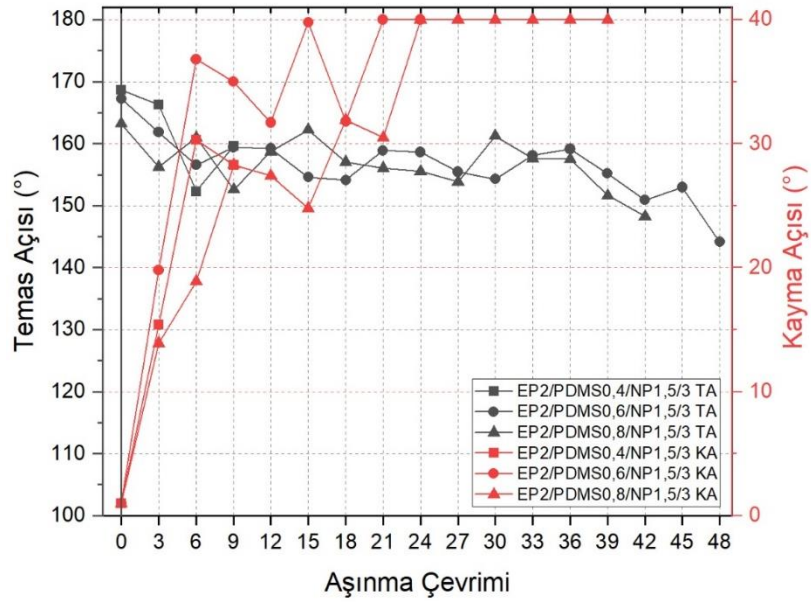
Şekil 11. 3 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 0,6 gram PDMS içeren EP-PDMS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim

Her iki siloksan türü ile üretilen kaplamalarda da 0,6 gram siloksan ve 1,5 gram nanoparçacık içeren kaplamaların en iyi abrazyif aşınma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. EP-PS kaplamalar arasında en yüksek aşınma dayanımına sahip olan EP₂/PS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın 15. çevrimin sonundan yüzeyden tamamen soyulduğu belirtilmişti. Buna karşın EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada 45. çevrimin sonunda dahi 150°'nin üzerinde temas açısı ölçülmüştür ve kaplama cam yüzeydeki varlığını korumuştur. Dolayısıyla nanoparçacık ve siloksan miktarının yanı sıra siloksan türünün de kaplamaların abrazyif aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın, aşınma sonucunda yüzey morfolojisinden meydana gelen değişim Şekil 12'de görülmektedir. Aşınma sonucunda kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü önemli oranda azalmıştır. Yüzeye homojen olarak dağılmış mikro yapılar, aşınmaya bağlı olarak yerini yüksekliği daha küçük ve daha büyük boyutlu mikro yapılara bırakmıştır.

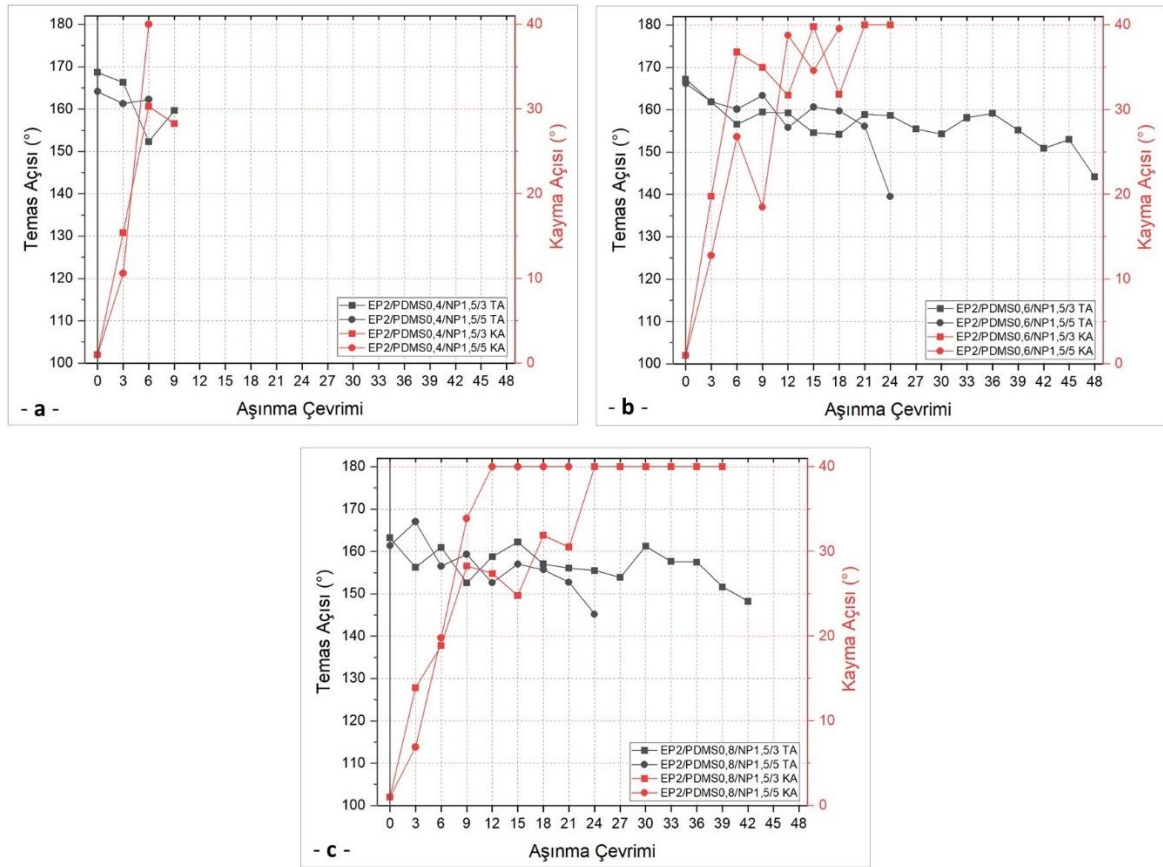


Şekil 12. EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın yüzeyinde aşınma sonucunda meydana gelen morfolojik değişim a) aşınma öncesi b) aşınma sonrası

3 saniye uygulama süresi ile üretilen ve 1,5 gram SiO₂ nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim Şekil 13'te verilmiştir. EP₂/PDMS_{0,4}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamanın 12. aşınma çevrimi sonunda yüzeyden büyük oranda soyulmuş olması nedeniyle temas açısı ölçülemez. 0,4 gram PDMS içeren bu kaplamanın aşınma dayanımı, 0,6 ve 0,8 gram PDMS içeren kaplamalara göre oldukça düşüktür. PDMS miktarındaki artışla birlikte kaplamaların aşınma dayanımı önemli oranda artış göstermiştir. EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada 48. çevrimin sonunda, EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada ise 42. çevrimin sonunda temas açısı 150°'nin altında inmiştir. Temas açısındaki değişim yönüyle bu iki kaplama arasında önemli bir farklılık bulunmamasına karşın kayma açısındaki farklılıklar dikkat çekmektedir. EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada kayma açısı 21. çevrimin sonunda 40°'nin üzerine çıkmıştır. 24. çevrimin sonunda ise su damlasının yüzeye yapışması ve kaymaması sonucunda kayma açısı ölçülemez. EP₂/PDMS_{0,8}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplamada ise kayma açısı 24. çevrimin sonunda 40°'nin üzerine çıkmış ve 39. çevrimin sonuna değin su damlasının hala yüzeyde kayması nedeniyle 40-90° arasında kayma açıları ölçülmüştür.



Şekil 13. 1,5 gram SiO_2 nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların aşınma çevrimlerine bağlı olarak temas ve kayma açılarındaki değişim



Şekil 14. EP-PDMS kaplamaların doğrusal abrazyif aşınma dayanımının uygulama süresine bağlı olarak değişimi a) $\text{EP}_2/\text{PDMS}_{0,4}/\text{NP}_{1,5}$ b) $\text{EP}_2/\text{PDMS}_{0,6}/\text{NP}_{1,5}$ c) $\text{EP}_2/\text{PDMS}_{0,8}/\text{NP}_{1,5}$

Şekil 14’te, 1,5 gram SiO₂ nanoparçacık içeren EP-PDMS kaplamaların doğrusal abrazyif aşınma dayanımının uygulama süresine bağlı olarak değişimi görülmektedir. 0,4 gram PDMS içeren kaplamalarda uygulama süresinin doğrusal aşınma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Buna karşın 0,6 ve 0,8 gram PDMS içeren kaplamalarda uygulama süresindeki artış doğrusal aşınma dayanımını olumsuz etkilemektedir. En yüksek abrazyif aşınma dayanımının elde edildiği EP₂/PDMS_{0,6}/NP_{1,5}/3 kodlu kaplama; Tablo 3’te verilen, literatürde yer alan ve epoksi reçine kullanılarak üretilen süperhidrofobik kaplamaların büyük bölümünden daha iyi aşınma dayanımı özelliği sergilemiştir.

Tablo 3. Epoksi reçine kullanılarak sprey kaplama yöntemi ile üretilen ve mekanik dayanımları doğrusal abrazyif aşınma testi ile ölçülen süperhidrofobik kaplamalar ve test parametreleri

| Matris | Nanoparçacık Ortalama Parçacık Çapı | Yüzey | Aşındırıcı | Ağırlık Basınç | Sonuç: Temas açısı (TA) ve kayma açısındaki (KA) değişim | Ref. |
|--|---|-------------------------|------------------------------|------------------|--|------|
| Benzoksazin/Epoksi reçine | Mezo gözenekli SiO ₂ - | Cam | 120 gritlik SiC zımpara | 100 g 1,6 kPa | 290 cm sonunda TA>150° | [14] |
| Epoksi reçine/ Polidimetiksiloksan (PDMS) | SiO ₂ 20–30 nm | Magnezyum alaşımı levha | 1000 gritlik zımpara | 100 g | 900 cm sonunda süperhidrofobik özelliğini korumuştur. | [15] |
| Epoksi reçine | SiO ₂ 15 nm | Ahşap | 1000 meş boyutlu SiC zımpara | 5 kPa | 1000 cm sonunda TA≈150° ve KA<10°. | [16] |
| Epoksi reçine | SiO ₂ 5-50 nm | Alüminyum | 320 gritlik SiC zımpara | 200 g ~1 kPa | 900 cm sonunda süperhidrofobik özelliğini korumuştur. 1200 cm sonunda TA>150° ve KA=11°. | [17] |
| Epoksi reçine/ Polibenzoksazin | SiO ₂ 20 nm | Orta karbonlu çelik | 400 gritlik zımpara | 200 g | 200 cm sonunda süperhidrofobik özelliğini korumuştur. | [18] |
| Epoksi reçine | Al ₂ O ₃ 30 nm | Alüminyum | 80 gritlik zımpara | 500 g ~5 kPa | 2000 cm sonunda süperhidrofobik özelliğini korumuştur. | [11] |

EP-PDMS kaplamaların doğrusal aşınma dayanımının nanoparçacık ve siloksan miktarının yanı sıra uygulama süresine de bağlı olarak önemli değişiklikler gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek doğrusal aşınma dayanımı 1,5 gram SiO₂ nanoparçacık ve 0,6 ile 0,8 gram PDMS içeren kaplamalarda elde edilmiştir. Uygulama süresindeki artış kaplamanın doğrusal aşınma dayanımının azalmasına neden olmuştur. Bir diğer önemli sonuç ise 5 saniye uygulama süresi ile üretilen EP-PDMS kaplamaların abrazyif aşınma dayanımlarının düşük olmasına rağmen, bu kaplamaların yüksek dinamik darbe dayanım özelliği sergilemiş olmasıdır.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, sprey kaplama yöntemi ile hazırlanan süperhidrofobik kaplamaların üretim parametreleri ile mekanik aşınma davranışları arasındaki ilişki tartışılmıştır. Her iki siloksan türünde de epoksiye göre ağırlıkça %75 oranında nanoparçacık içeren kaplamalarda aşınma dayanımının diğer nanoparçacık yoğunluklarına göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. EP-PS kaplamalarda epoksiye göre ağırlıkça %30 oranında PS, EP-PDMS kaplamalarda ise %30 ve %40 oranında PDMS içeren kaplamaların yüksek aşınma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Nanoparçacık ve siloksan miktarının yanı sıra siloksan türü de aşınma direnci üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. EP-PDMS kaplamalar uzun aşınma çevrimlerinden sonra dahi su iticiliklerini korumuştur. Bu çalışmada elde edilen önemli sonuçlardan bir diğeri ise EP-PDMS kaplamaların uygulama süresi ile aşınma direnci arasındaki ilişkidir. 5 saniye uygulama süresi ile üretilen EP-PDMS kaplamaların darbe dayanımı, 3 saniye uygulama süresi ile üretilen EP-PDMS kaplamaların ise doğrusal aşınma dayanımının belirgin olarak iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Kaplamaların maruz kalacağı dış ortam koşulları dikkate alınarak uygulama süresi belirlenebilir ve kaplamaların farklı özelliklerdeki ortamlarda daha uzun süre su iticilik özelliğini koruması mümkün kılınabilir.

Süperhidrofobik kaplamalar sahip oldukları birçok avantajın yanı sıra buz ile yüzey arasında zayıf adezyon kuvveti oluşumu, buzlanmayı geciktirme ve buzlanmayı azaltma özellikleri nedeniyle hava araçlarında kullanım potansiyeli taşımaktadır. Süperhidrofobik kaplamaların hava araçlarında kullanımının önündeki en büyük engel, bu kaplamaların dış ortam koşullarında su iticiliklerini uzun süre koruyabilecek mekanik dayanım özelliği göstermemesidir. Bu çalışmada polimer türü, siloksan türü ve miktarı, nanoparçacık miktarı ve uygulama süresi farklılaştırılarak dış ortam koşullarında su iticilik özelliğini koruyabilecek kaplamalar üretilmiştir. Mekanik dayanım özellikleri çok daha yüksek ve uzun ömürlü su itici kaplamaların üretilmesi, hava araçlarında bulunan aktif buz önleme sistemine ek olarak bu pasif yapıların da hava araçlarında kullanımının önünü açacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Malzeme desteği nedeniyle Evonik Türkiye'ye, altyapı desteği nedeniyle Hamata ve Biyopol'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hwang H.S., Kim N.H., Lee S.G., Lee D.Y., Cho K., Park I., Facile Fabrication of Transparent Superhydrophobic Surfaces by Spray Deposition, ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3 (7), 2179–2183, <https://doi.org/10.1021/am2004575>.
- [2] Kulinich S.A., Farhadi S., Nose K., Du X.W., Superhydrophobic Surfaces: Are They Really Ice-Repellent?, Langmuir, 2011, 27 (1), 25–29, <https://doi.org/10.1021/la104277q>.
- [3] Lazauskas A., Guobienė A., Prosyčėvas I., Baltrušaitis V., Grigaliūnas V., Narmontas P., et al., Water Droplet Behavior on Superhydrophobic SiO₂ Nanocomposite Films during Icing/Deicing Cycles, Materials Characterization, 2013, 82, 9–16, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2013.04.017>.
- [4] Milionis A., Loth E., Bayer I.S., Recent Advances in the Mechanical Durability of Superhydrophobic Materials, Advances in Colloid and Interface Science, 2016, 229, 57–79, <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.12.007>.
- [5] ImageJ Image Processing and Analysis in Java, <https://imagej.nih.gov/ij/>
- [6] Li K., Zeng X., Li H., Lai X., Ye C., Xie H., Study on the Wetting Behavior and Theoretical Models of Polydimethylsiloxane/Silica Coating, Applied Surface Science, 2013, 279, 458–463, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.04.137>.

- [7] Zhu B., Liu J., Chen Y., Liu Y., Yang Z., Zhang Z., Superhydrophobic Coating with Multiscale Structure Based on Crosslinked Silanized Polyacrylate and Nanoparticles, *Surface and Coatings Technology*, 2017, 331 40–47, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.10.040>.
- [8] Zhang C., Kalulu M., Sun S., Jiang P., Zhou X., Wei Y., et al., Environmentally Safe, Durable and Transparent Superhydrophobic Coating Prepared by One-Step Spraying, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 570, 147–155, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.03.015>.
- [9] Guo D., Chen J., Hou K., Xu S., Cheng J., Wen X., et al., A Facile Preparation of Superhydrophobic Halloysite-Based Meshes for Efficient Oil–Water Separation, *Applied Clay Science*, 2018, 156, 195–201, <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.01.034>.
- [10] Liao R., Zuo Z., Guo C., Zhuang A., Yuan Y., Zhao X., et al., Ice Accretion on Superhydrophobic Insulators under Freezing Condition, *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 112, 87–94, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.01.006>.
- [11] Wu B., Lyu J., Peng C., Jiang D., Yang J., Yang J., et al., Inverse Infusion Processed Hierarchical Structure towards Superhydrophobic Coatings with Ultrahigh Mechanical Robustness, *Chemical Engineering Journal*, 2020, 387, 124066, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124066>.
- [12] Xue C.H., Zhang Z.D., Zhang J., Jia S.T., Lasting and Self-Healing Superhydrophobic Surfaces by Coating of Polystyrene/SiO₂ Nanoparticles and Polydimethylsiloxane, *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2 (36), 15001–15007, <https://doi.org/10.1039/C4TA02396J>.
- [13] Ren T., Tang G., Yuan B., Yan Z., Ma L., Huang X., One-Step Fabrication of Robust Superhydrophobic Coatings with Corrosion Resistance by a Self-Curing Epoxy-Resin-Based Adhesive, *Surface and Coatings Technology*, 2019, 380, 125086, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125086>.
- [14] Li X., Zhao S., Hu W., Zhang X., Pei L., Wang Z., Robust Superhydrophobic Surface with Excellent Adhesive Properties Based on Benzoxazine/Epoxy/Mesoporous SiO₂, *Applied Surface Science*, 2019, 481, 374–378, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.114>.
- [15] Li D.-W., Wang H.-Y., Liu Y., Wei D.-S., Zhao Z.-X., Large-Scale Fabrication of Durable and Robust Super-Hydrophobic Spray Coatings with Excellent Repairable and Anti-Corrosion Performance, *Chemical Engineering Journal*, 2019, 367, 169–179, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.093>.
- [16] Wu Y., Jia S., Wang S., Qing Y., Yan N., Wang Q., et al., A Facile and Novel Emulsion for Efficient and Convenient Fabrication of Durable Superhydrophobic Materials, *Chemical Engineering Journal*, 2017, 328, 186–196, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.07.023>.
- [17] Elzaabalawy A., Meguid S.A., Development of Novel Superhydrophobic Coatings Using Siloxane-Modified Epoxy Nanocomposites, *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398, 125403, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125403>.
- [18] Lou C., Zhang R., Lu X., Zhou C., Xin Z., Facile Fabrication of Epoxy/Polybenzoxazine Based Superhydrophobic Coating with Enhanced Corrosion Resistance and High Thermal Stability, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 562, 8–15, <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.10.066>.



Interval Valued q - Rung Orthopair Hesitant Fuzzy Choquet Aggregating Operators in Multi-Criteria Decision Making Problems

Şerif ÖZLÜ

Nizip Vocational High School of Gaziantep University, Marketing and Advertising Department, 27700, NİZİP/GAZİANTEP

Article Info

Research article

Received: 15.12.2021

Revision: 30.04.2022

Accepted: 09.05.2022

Keywords

Q - Rung orthopair
hesitant fuzzy sets,
Choquet integral,
Aggregating operators

Abstract

In this paper, we introduce Interval valued q - Rung Orthopair Hesitant fuzzy sets (IVq-ROHFS) with motivation of Interval valued pythagorean Hesitant fuzzy sets [44] as a new concept. Then, we give some basic operations as complement, union, intersection, addition, scalar multiplication, scalar power. Also, we combine to (IVq-ROHFS) and choquet integral together with aggregating operators and develop to Interval valued q - rung orthopair hesitant fuzzy Choquet averaging operator (IVq-ROHCA) and Interval valued q - rung orthopair hesitant fuzzy Choquet geometric operator (IVq-ROHCG). Then, we offer to indicate soft approach of proposed IVq-ROHCA and IVq-ROHCG an example adopted from Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Choquet integral based TOPSIS (IVIHCI) [43]. The obtained results are agreement with IVIHCI but presented IVq-ROHCA and IVq-ROHCG have more advantages than existing structures as Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy sets (IVIHFS), interval-valued Pythagorean Hesitant fuzzy sets (IVPHFS) owing to reasons changing according to need, requirement, prefer of decision makers and moreover because of IVIHFS and IVPHFS are special cases of IVq-ROHFS. It is open from comparative analysis that while some of offered approaches like IVIHFS, IVPHFS etc. are giving no solution for some values, our operators present to needed results.

1. INTRODUCTION

Decision making is almost a subject to be used for each area of life. Therefore, this subject has been worked by several scholars but these problems can include some complexity information, limitations, undefined statements. To handle with these various cases, more approaches have been defined like fuzzy sets [1], Intuitionistic fuzzy sets, Interval valued intuitionistic fuzzy sets [2, 6], Pythagorean fuzzy sets [3], Hesitant fuzzy sets [4, 5]. One of the most important structures is Intuitionistic fuzzy sets [2] which is known as generalizing of fuzzy sets. In here, the basic idea is that sum of the membership degree and the nonmembership degree is equal or less than 1 and this concept has been applied over novel constructions as following; Chen [7] offered distance measures based on the Hausdorff metric, Chen and Chang [8] presented similarity measure based on transformation techniques and applied MCDM, Guo and Song [9] used entropy measures over Atanassov's intuitionistic fuzzy sets, Xu and Yager [10] put forward some geometric aggregation operators with helping to Intuitionistic fuzzy sets, Xu [11] discussed Intuitionistic fuzzy aggregation operators in 2007, Liu et al. [12] defined the intuitionistic fuzzy linguistic cosine similarity measure and tested its application in pattern recognition and also Park et al. [13] presented a decision making algorithm based on TOPSIS under Interval valued intuitionistic fuzzy sets environment, Tan and Zhang [14] offered DCM by using Interval valued intuitionistic fuzzy sets. In next time, this approach has been updated owing to shortcomings of intuitionistic set like $\langle 0.3, 0.9 \rangle$ and $0.3 + 0.9 > 1$ and Yager [3] proposed pythagorean fuzzy sets which is defined as square of sum of the membership degree and the nonmembership degree is equal or less than 1. Then, several authors extended over different concepts to this cluster. Some of these papers can be ordered as follow; Yager and coauthor, Yager [15, 16] worked Pythagorean membership grade and made an application in DCM and weighted average operator and weighted power average operator, respectively, Peng and yang [17] revealed some results for Pythagorean fuzzy sets in 2015, Garg [18, 19] gave correlation coefficient based on Pythagorean fuzzy sets and also However, hesitation degree of information can face with different statements especially if novel

decision makers who have different opinions about an element want to have comment, in this statement, the existing clusters do not overcome. Therefore, Torra and, Torra and Narukawa [4, 5] have presented to Hesitant fuzzy sets. Then, this concept has been converted to different clusters, Dual hesitant fuzzy sets [22], Generalized hesitant fuzzy sets [23], Triangular hesitant fuzzy set [24], multi-hesitant fuzzy sets [25], then Pythagorean Hesitant Fuzzy Set [26] was defined by combining hesitant fuzzy sets and Pythagorean fuzzy sets. Moreover, Zhang and others [44] put forward Interval Valued Pythagorean Hesitant Fuzzy Set and gave its application to MCDM, Wei and Lu, [27] Tang and Wei [28] proposed Dual hesitant Pythagorean fuzzy Hamacher aggregation operators and Dual hesitant Pythagorean fuzzy information in a decision making method, Khan et al. [29] aggregated Pythagorean hesitant fuzzy information. The Choquet integral is very useful tool to eliminate hesitation degree and Choquet integral operator has been widely used with Pythagorean fuzzy sets, hesitant fuzzy sets, Pythagorean hesitant fuzzy sets, intuitionistic fuzzy sets see [30, 31, 32, 33, 34].

Sometimes, the experts can encounter with situations which not to be expressed with helping to above existing clusters for Decision making problems in real life as $\langle 0.8, 0.7 \rangle$ and $0.8^2 + 0.7^2 > 1$ but this problem can be solved by defining $0.8^q + 0.7^q < 1$ for $q \geq 3$. To eliminate this limitation, Yager [35] defined q-rung orthopair fuzzy sets. It can be said that this concept is generalization of IFS and PFS and wider area is scanned than IFS and PFS. Also, in short time this cluster has been started to be worked by several scholars. Liu and Wang [36] developed some aggregation operators over q-rung orthopair fuzzy sets, Liu and coworker [37] presented Bonferroni mean operators based on q-ROF, Hamy mean operators over q-rung orthopair fuzzy sets were tested by Wang et al. [38]. Moreover, Wei et al. [39] proposed Maclaurin symmetric mean operators and surveyed applications over potential evaluation of emerging technology. In addition to, some works for q-ROF can be seen by surveying [40, 41, 42]. Although the above defined approaches, the restricted information is not completely eliminated. Interval Valued Pythagorean Hesitant Fuzzy Set was worked by Zhang et al [44] in 2020. In here, Zhang et al. defined with intervals by dividing membership value and non-membership value as $\langle [\mu^-, \mu^+], [v^-, v^+] \rangle$ with condition $(\mu^+)^2 + (v^+)^2 \leq 1$ but this definition includes some vagueness statements. When $\mu^+ = 0.8$, $v^+ = 0.7$ are determined, this cluster encounters with non- solution cases. With this motivation, in this paper, we define interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy set (IVq-ROHFS) having soft, changeable structure. The above defined problem is relaxable solved with IVq-ROHFS for $q=3$, $0.8^3 + 0.7^3 \leq 1$. Then, some basic definitions, theorems are produced for this new concept as union, intersection, addition, multiplication, scalar multiplication, scalar power. Moreover, score function is investigated over IVq-ROHFS. In addition to, we combine IVq-ROHFS and choquet integral together with aggregating operators. Then, the obtained concept is applied for an example over Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy Choquet integral (IVIHF) based on TOPSIS [43]. In here, the example is solved for a lot of values of q and the results are almost agreement but it should be noted that our proposed operators have more advantages than existing used IVIHFC because of soft construction of q-ROF. Finally, we offer comparative analysis and change some values of decision making matrix in previous example, while compared papers do not give result, our proposed concept achieves this. This structure can be utilized in several areas as medical diagnosis, engineering, MCDM environment etc..

The remaining of paper is organized as follow; second section includes the basic definitions and propositions of PFS, HFS, q-ROF; in third section, we present interval valued q-rung orthopair hesitant fuzzy sets and put forward the basic operations; section 4 introduces Interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy Choquet averaging operator and Interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy Choquet geometric operator and some properties; section 5 includes a numerical example; section 6 proposes a comparative analysis; the end section offers conclusion and some notes.

2. PRELIMINARY

In this section, we recall some basic notions of hesitant fuzzy sets and the q -rung orthopair fuzzy set.

Definition 2.1 [1] Let E be a universe. A fuzzy set X over E is a mapping defined as follows:

$$X = \{(\mu_X(x)/x) : x \in E\}$$

where $\mu_X: E \rightarrow [0,1]$.

Here, μ_X called membership function of X , and the value $\mu_X(x)$ is called the grade of membership of $x \in E$. The value represents the degree of x belonging to the fuzzy set X .

Then, Fuzzy sets have been extended as HFSs in [5] .

Definition 2.2 [5] Let X be a non-empty set. Then, a hesitant fuzzy set (shortly HFS) in X is in terms of a function that when applied to X return a subset of $[0,1]$. We express the HFS by

$$A = \{(x, \xi_A(x)) : x \in X\},$$

where $\xi_A(x)$ is a set of some values in $[0,1]$, denoting the possible membership degrees of the element $x \in X$ to the set A , $\xi = \xi_A(x)$ is called a hesitant fuzzy element (HFE) and $\mathcal{H}(X)$ denotes the set of all HFEs on X .

While this structure is not meeting enough needs, *DHPFSs* have been defined.

Definition 2.3 [27] Let X be a non-empty set. Then, a dual hesitant pythagorean fuzzy set (shortly *DHPFS*) in X is defined in terms of two functions that when applied to X return a subset of different values of $[0,1]$. We express the *DHPFS* by

$$A = \{(x, \mu_A(x), \nu_A(x)) : x \in X\},$$

where $\mu_A(x), \nu_A(x)$ are two sets of some values in $[0,1]$, denoting the membership degrees and non-membership degrees of the element $x \in X$ to the set A and $\mathcal{D}(X)$ denotes the set of all *DHPFEs* on X and it holds that

$$0 \leq \gamma^2 + \eta^2 \leq 1$$

where for all $x \in X$, $\mu_A(x) = \bigcup_{\gamma \in \mu_A(x)} \{\gamma\}$ $\nu_A(x) = \bigcup_{\eta \in \nu_A(x)} \{\eta\}$ and γ^+, η^+ are maximum elements in $\mu_A(x), \nu_A(x)$.

Then, interval valued pythagorean hesitant fuzzy set was defined with intervals by dividing membership value and non-membership value as $\langle [\mu^-, \mu^+], [\nu^-, \nu^+] \rangle$ with condition $(\mu^+)^2 + (\nu^+)^2 \leq 1$.

Definition 2.4 [44] Let X be a reference set. A interval valued pythagorean hesitant fuzzy set P is defined as follows:

$$P = \langle (x, h_P(x)) : x \in X \rangle,$$

for

$$h_P(x) = \{(\mu_P(x), \nu_P(x)) : \mu_P(x) = [\mu_P^-(x), \mu_P^+(x)] \in [0,1], \nu_P(x) = [\nu_P^-(x), \nu_P^+(x)] \in [0,1], (\mu_P^+(x))^2 + (\nu_P^+(x))^2 \leq 1\}$$

and

$$\pi_P(x) = \{[\pi_P^-(x), \pi_P^+(x)] : \pi_P^-(x) = (1 - (\mu_P^-(x))^2 - (\nu_P^-(x))^2)^{\frac{1}{2}}, \pi_P^+(x) = (1 - (\mu_P^+(x))^2 - (\nu_P^+(x))^2)^{\frac{1}{2}}, \langle [\mu_P^-(x), \mu_P^+(x)], [\nu_P^-(x), \nu_P^+(x)] \rangle = \langle \mu_P(x), \nu_P(x) \rangle\}$$

Definition 2.5 [35] Let X be a non-empty set. Then, a q -rung orthopair fuzzy set (shortly *q-ROFS*) in X is defined in terms of two functions that when applied to X return a subset of different values of $[0,1]$. We

express the q-ROFS by

$$A = \{(x, \mu_A(x), \nu_A(x)): x \in X\},$$

where $\mu_A(x), \nu_A(x)$ are two elements in $[0,1]$, denoting the membership degrees and non-membership degrees of the element $x \in X$ and it holds that $0 \leq \gamma^q + \eta^q \leq 1$ where for all $x \in X$.

Definition 2.6 [44] Let $h_P = \{(\mu, \nu): \mu = [\mu^-, \mu^+], \nu = [\nu^-, \nu^+]\}, h_{P_1} = \{(\mu_1, \nu_1): \mu = [\mu_1^-, \mu_1^+], \nu = [\nu_1^-, \nu_1^+]\}$ and $h_{P_2} = \{(\mu_2, \nu_2): \mu = [\mu_2^-, \mu_2^+], \nu = [\nu_2^-, \nu_2^+]\}$ be three IVPHFS sets over X . The basic concepts of IVPHFS are defined as follows:

- $h_{P_1} \cup h_{P_2} = \{([\max\{\mu_1^-, \mu_2^-\}, \max\{\mu_1^+, \mu_2^+\}], [\min\{\nu_1^-, \nu_2^-\}, \min\{\nu_1^+, \nu_2^+\}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{P_i}, i = 1, 2\}$,
- $h_{P_1} \cap h_{P_2} = \{([\min\{\mu_1^-, \mu_2^-\}, \min\{\mu_1^+, \mu_2^+\}], [\max\{\nu_1^-, \nu_2^-\}, \max\{\nu_1^+, \nu_2^+\}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{P_i}, i = 1, 2\}$,
- $h_P^c = \{([\nu^-, \nu^+], [\mu^-, \mu^+]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_P\}$,
- $h_P^\lambda = \{([\mu^{\lambda-}, \mu^{\lambda+}], [(1 - (1 - (\nu^-)^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}}, (1 - (1 - (\nu^+)^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}}]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_P\}$,
- $\lambda h_P = \{([(1 - (1 - (\mu^-)^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}}, (1 - (1 - (\mu^+)^2)^\lambda)^{\frac{1}{2}}], [(\nu^-)^\lambda, (\nu^+)^\lambda]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_P\}$,

$$h_{P_1} \oplus h_{P_2} = \{([\frac{((\mu_1^-)^2 + (\mu_2^-)^2 - (\mu_1^-)^2(\mu_2^-)^2)^{\frac{1}{2}}}{2}, \frac{((\mu_1^+)^2 + (\mu_2^+)^2 - (\mu_1^+)^2(\mu_2^+)^2)^{\frac{1}{2}}}{2}], [\frac{(\nu_1^- \nu_2^- + \nu_1^+ \nu_2^+)^{\frac{1}{2}}}{2}, \frac{(\nu_1^- \nu_2^- + \nu_1^+ \nu_2^+)^{\frac{1}{2}}}{2}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{P_i}, i = 1, 2\}$$

$$h_{P_1} \otimes h_{P_2} = \{([\frac{(\mu_1^- \mu_2^- + \mu_1^+ \mu_2^+)^{\frac{1}{2}}}{2}, \frac{((\nu_1^-)^2 + (\nu_2^-)^2 - (\nu_1^-)^2(\nu_2^-)^2)^{\frac{1}{2}}}{2}], [\frac{((\nu_1^+)^2 + (\nu_2^+)^2 - (\nu_1^+)^2(\nu_2^+)^2)^{\frac{1}{2}}}{2}, \frac{((\nu_1^+)^2 + (\nu_2^+)^2 - (\nu_1^+)^2(\nu_2^+)^2)^{\frac{1}{2}}}{2}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{P_i}, i = 1, 2\}$$

3. INTERVAL VALUED Q- RUNG ORTHOPAIR HESITANT FUZZY SETS

The concept of q- Rung Orthopair fuzzy sets (q-ROFS) was defined by Yager [35] in 2016. In this section, interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy set (IVq-ROHFS) is defined and some basic properties are given.

Definition 3.1 Let X be a reference set. A interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy set \mathfrak{R} is defined as follows:

$$\mathfrak{R} = \{(x, h_{\mathfrak{R}}(x)): x \in X\},$$

For

$$h_{\mathfrak{R}}(x) = \{(\mu_{\mathfrak{R}}(x), \nu_{\mathfrak{R}}(x)): \mu_{\mathfrak{R}}(x) = [\mu_{\mathfrak{R}}^-(x), \mu_{\mathfrak{R}}^+(x)] \in [0,1], \nu_{\mathfrak{R}}(x) = [\nu_{\mathfrak{R}}^-(x), \nu_{\mathfrak{R}}^+(x)] \in [0,1], (\mu_{\mathfrak{R}}^+(x))^q + (\nu_{\mathfrak{R}}^+(x))^q \leq 1\}$$

and

$$\pi_{\mathfrak{R}}(x) = \{[\pi_{\mathfrak{R}}^-(x), \pi_{\mathfrak{R}}^+(x)]: \pi_{\mathfrak{R}}^-(x) = (1 - (\mu_{\mathfrak{R}}^-(x))^q - (\nu_{\mathfrak{R}}^-(x))^q)^{\frac{1}{q}}, \pi_{\mathfrak{R}}^+(x) = (1 - (\mu_{\mathfrak{R}}^+(x))^q - (\nu_{\mathfrak{R}}^+(x))^q)^{\frac{1}{q}}, \langle [\mu_{\mathfrak{R}}^-(x), \mu_{\mathfrak{R}}^+(x)], [\nu_{\mathfrak{R}}^-(x), \nu_{\mathfrak{R}}^+(x)] \rangle = \langle \mu_{\mathfrak{R}}(x), \nu_{\mathfrak{R}}(x) \rangle\}$$

in here we call cluster of pairs $h_{\mathfrak{H}} = h_{\mathfrak{H}}(x)$ as interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy set (IVq-ROHFS) and is indicated $h_{\mathfrak{H}} = \{(\mu, \nu): \mu = [\mu^-, \mu^+], \nu = [\nu^-, \nu^+], (\mu^+)^q + (\nu^+)^q \leq 1\}$.

Definition3.2 *Let*

$h_{\mathfrak{H}_1} = \{(\mu, \nu): \mu = [\mu^-, \mu^+], \nu = [\nu^-, \nu^+]\}$, $h_{\mathfrak{H}_1} = \{(\mu_1, \nu_1): \mu = [\mu_1^-, \mu_1^+], \nu = [\nu_1^-, \nu_1^+]\}$ and $h_{\mathfrak{H}_2} = \{(\mu_2, \nu_2): \mu = [\mu_2^-, \mu_2^+], \nu = [\nu_2^-, \nu_2^+]\}$ be three IVq-ROHFS sets over X . The basic concepts of IVq-ROHFS are defined as follows:

$$h_{\mathfrak{H}_1} \cup h_{\mathfrak{H}_2} = \{([\max\{\mu_1^-, \mu_2^-\}, \max\{\mu_1^+, \mu_2^+\}], [\min\{\nu_1^-, \nu_2^-\}, \min\{\nu_1^+, \nu_2^+\}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{\mathfrak{H}_i}, i = 1, 2\},$$

$$\bullet h_{\mathfrak{H}_1} \cap h_{\mathfrak{H}_2} = \{([\min\{\mu_1^-, \mu_2^-\}, \min\{\mu_1^+, \mu_2^+\}], [\max\{\nu_1^-, \nu_2^-\},$$

$$\max\{\nu_1^+, \nu_2^+\}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{\mathfrak{H}_i}, i = 1, 2\}$$

$$\bullet h_{\mathfrak{H}}^c = \{([\nu^-, \nu^+], [\mu^-, \mu^+]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_{\mathfrak{H}}\},$$

$$\bullet h_{\mathfrak{H}}^\lambda = \{([\mu^{\lambda-}, \mu^{\lambda+}], [(1 - (1 - (\nu^-)^q)^\lambda)^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\nu^+)^q)^\lambda)^{\frac{1}{q}}]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_{\mathfrak{H}}\},$$

$$\bullet \lambda h_{\mathfrak{H}} = \{([(1 - (1 - (\mu^-)^q)^\lambda)^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu^+)^q)^\lambda)^{\frac{1}{q}}], [(\nu^-)^\lambda, (\nu^+)^\lambda]): \langle \mu, \nu \rangle \in h_{\mathfrak{H}}\},$$

$$\bullet h_{\mathfrak{H}_1} \oplus h_{\mathfrak{H}_2} = \{([\frac{((\mu_1^-)^q + (\mu_2^-)^q - (\mu_1^-)^q(\mu_2^-)^q)^{\frac{1}{q}}}{((\mu_1^+)^q + (\mu_2^+)^q - (\mu_1^+)^q(\mu_2^+)^q)^{\frac{1}{q}}}, [\nu_1^-, \nu_2^-], \nu_1^+, \nu_2^+]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{\mathfrak{H}_i}, i = 1, 2\}$$

$$\bullet h_{\mathfrak{H}_1} \otimes h_{\mathfrak{H}_2} = \{([\mu_1^-, \mu_2^-, \mu_1^+, \mu_2^+], [(\frac{(\nu_1^-)^q + (\nu_2^-)^q - (\nu_1^-)^q(\nu_2^-)^q}{(\nu_1^+)^q + (\nu_2^+)^q - (\nu_1^+)^q(\nu_2^+)^q})^{\frac{1}{q}}]): \langle \mu_i, \nu_i \rangle \in h_{\mathfrak{H}_i}, i = 1, 2\}$$

Definition 3.3 *Let $h_{\mathfrak{H}_1} = \{(\mu_1, \nu_1): \mu = [\mu_1^-, \mu_1^+], \nu = [\nu_1^-, \nu_1^+]\}$ be IVq-ROHFe. In this statement score function of $h_{\mathfrak{H}}$ is defined as follow;*

$$S(h_{\mathfrak{H}}) = \sum_{\tilde{r} \in h_{\mathfrak{H}}} = \frac{1}{2l(h_{\mathfrak{H}})} [((\mu_1^-)^q - (\nu_1^-)^q) + ((\mu_1^+)^q - (\nu_1^+)^q)]$$

where $l(h_{\mathfrak{H}})$ indicates number of elements in IVq-ROHFS and also for two IVq-ROHFe which is showed as $h_{\mathfrak{H}_1}$ and $h_{\mathfrak{H}_2}$;

1. if $S(h_{\mathfrak{H}_1}) > S(h_{\mathfrak{H}_2})$, $h_{\mathfrak{H}_1} > h_{\mathfrak{H}_2}$,
2. if $S(h_{\mathfrak{H}_1}) < S(h_{\mathfrak{H}_2})$, $h_{\mathfrak{H}_1} < h_{\mathfrak{H}_2}$,
3. if $S(h_{\mathfrak{H}_1}) = S(h_{\mathfrak{H}_2})$, $h_{\mathfrak{H}_1} = h_{\mathfrak{H}_2}$.

3.1 Fuzzy measure and Choquet integral operator

The fuzzy measure introduced by Sugeno in 1974 [45] was successfully utilized for MCDM problems. Then, choquet integral [46] was used as a powerful notation to aggregating operators. In here, we give to fuzzy measure, choquet integral, discrete choquet integral.

Definition 3.4 A fuzzy measure over X is a function $\mathfrak{R}: P(X) \rightarrow [0,1]$ satisfying following conditions;

1. $\mathfrak{R}(\emptyset) = 0, \mathfrak{R}(X) = 1,$
2. If M and $N \in P(X)$ and $M \subseteq N$ then $\mathfrak{R}(M) \leq \mathfrak{R}(N).$

But Sugeno [45] proposed some special conditions of fuzzy measure due to reasons like complexity into calculations as follow;

$\mathfrak{R}(M \cup N) = \mathfrak{R}(M) + \mathfrak{R}(N) + \lambda \mathfrak{R}(M)\mathfrak{R}(N)$ and $\lambda \in (-1, \infty)$ for all $M, N \in P(X)$ and $M \cap N = \emptyset$. If $\lambda = 0$, λ - fuzzy measure is induced additive measure as follow;

1. $\mathfrak{R}(M \cup N) = \mathfrak{R}(M) + \mathfrak{R}(N)$

If all elements in X are finite, then;

$$\bullet \mathfrak{R}(X) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} \prod_{i=1}^n [1 + \lambda \mathfrak{R}(x_i)] - 1, & \lambda \neq 0 \\ \sum_{x_i \in M} \mathfrak{R}(x_i), & \lambda = 0. \end{cases}$$

Definition 3.5 [46] Let f be positive reel valued function on X and \mathfrak{R} be fuzzy measure on X . The discrete Choquet integral of f with respect to \mathfrak{R} is proposed as follow;

$$C_{\mathfrak{R}}(f) = \sum_{i=1}^n f_{\sigma(i)} [\mathfrak{R}(A_{\sigma(i)}) - \mathfrak{R}(A_{\sigma(i-1)})],$$

where $\sigma(i)$ indicates a permutation on X such that $f_{\sigma(1)} \geq f_{\sigma(2)} \geq \dots \geq f_{\sigma(n)}$ and $A_{\sigma(i)} = 1, 2, \dots, i$, $A_{\sigma(0)} = \emptyset$.

4. INTERVAL VALUED Q- RUNG ORTHOPAIR HESITANT FUZZY CHOQUET AGGREGATING OPERATORS

In this section, we define averaging operators, geometric operators based on choquet integral and their some properties.

Definition 4.1 Let determine collection of IVq -ROHFSs that $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i): \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu_i = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$ where $(i = 1, 2, \dots, n)$ and $\sigma(i)$ indicates to a permutation of $1, 2, \dots, n$ such that $\mathfrak{R}_{\sigma(1)} \geq \mathfrak{R}_{\sigma(2)} \geq \dots \geq \mathfrak{R}_{\sigma(n)}$ and $\mathfrak{R}_{\sigma(0)} = \emptyset$ in here, Interval valued q - rung orthopair hesitant fuzzy Choquet integral averaging operator (IVq -ROHFCA) is defined as follow;

$$IV - qROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) = \{ \left[\left((1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}) \right)^{\frac{1}{q}}, \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}) \right)^{\frac{1}{q}} \right], \left[\prod_{i=1}^n (\nu_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}, \prod_{i=1}^n (\nu_{\sigma(i)}^+)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \right] \}$$

Theorem 4.2 Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i): \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu_i = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$ and $\sigma(i)$ indicates to a permutation of $1, 2, \dots, n$ such that $\mathfrak{R}_{\sigma(1)} \geq \mathfrak{R}_{\sigma(2)} \geq \dots \geq \mathfrak{R}_{\sigma(n)}$ and $\mathfrak{R}_{\sigma(0)} = \emptyset$. $\mathfrak{R}_{\sigma(i)}$ is the i th largest element of \mathfrak{R}_i and their aggregated value is still IVq -ROHF.

Proof. It is trivial to show for $n = 1$, we proof for $n = 2$ and can write as follow;

$$(\mu(A_{\sigma(1)})\mathfrak{R}_1 = \{ \{ [(1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})})^{\frac{1}{q}}], [(v_{\sigma(1)}^-)^{\mu(A_{\sigma(1)})}, (v_{\sigma(1)}^+)^{\mu(A_{\sigma(1)})}], \} \}$$

and

$$(\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)}))\mathfrak{R}_2 = \{ \{ [(1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})})^{\frac{1}{q}}], [(v_{\sigma(2)}^-)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}, (v_{\sigma(2)}^+)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}], \} \}$$

from here

$$(\mu(A_{\sigma(1)})\mathfrak{R}_1 \oplus (\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)}))\mathfrak{R}_2 = \{ \{ ([(1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})}) + (1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}) - (1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})}) (1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})})]^{\frac{1}{q}}, ((1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})}) + (1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}) - (1 - (1 - (\mu_{\sigma(1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(1)})}) (1 - (1 - (\mu_{\sigma(2)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})})]^{\frac{1}{q}}], [(v_{\sigma(1)}^-)^{\mu(A_{\sigma(1)})}, (v_{\sigma(2)}^-)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}], [(v_{\sigma(1)}^+)^{\mu(A_{\sigma(1)})}, (v_{\sigma(2)}^+)^{\mu(A_{\sigma(2)}) - \mu(A_{\sigma(1)})}], \} \}$$

and thus for $n = 2$, it holds, we look for $n = k$;

$$IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_k) = \{ \{ [(1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}], [\prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}, \prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^+)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}], \} \}$$

and from here we can write for $n = k + 1$ as follow;

$$IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_{k+1}) = \{ \{ [(1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}, (-\prod_{i=1}^k (-\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}], [\prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}, \prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^+)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}], \} \}$$

$$\prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} \oplus \{[(1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})})^{\frac{1}{q}}], [(v_{\sigma(k+1)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)}))}, (v_{\sigma(k+1)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)}))}]\}$$

and from here

$$\{[(1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})}) + (1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})}) - (1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})(1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})})^{\frac{1}{q}}, ((1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})}) + (1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})}) - (1 - \prod_{i=1}^k (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})(1 - (1 - (\mu_{\sigma(k+1)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)})})^{\frac{1}{q}}], [(\prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}), ((v_{\sigma(k+1)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)}))}), (\prod_{i=1}^k (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}), ((v_{\sigma(k+1)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(k+1)})-\mu(A_{\sigma(k)}))}]\}$$

and if the basic operations are made, it holds for $n = k + 1$ as follow;

$$IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_{k+1}) = \{[(1 - \prod_{i=1}^{k+1} (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - \prod_{i=1}^{k+1} (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}], [\prod_{i=1}^{k+1} (v_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}, \prod_{i=1}^{k+1} (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}]\}$$

the proof is completed.

Theorem 4.3 (idempotency) Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, v_i): \mu = [\mu_i^-, \mu_i^+], v = [v_i^-, v_i^+]\}$ and $\mathfrak{R}_i = \mathfrak{R}$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$. Thus, $IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) = \mathfrak{R}$

Proof. From the theorem 4.2, can be written as follow;

$$= \{[(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}, (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}], [\prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}, \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}]\}$$

from here

$$= \{[(1 - (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}}], [(v_{\sigma(i)}^-)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))}, (v_{\sigma(i)}^+)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))}]\}$$

since $\sum_{i=1}^n \mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}) = 1$

$$IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) = \{[(1 - (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\frac{1}{q}}, (1 - (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\frac{1}{q}})], [(v_{\sigma(i)}^-), (v_{\sigma(i)}^+)]\} = \mathfrak{R}$$

Theorem 4.4 (Monotonicity) If $\mathfrak{R}_i \leq \mathfrak{R}_i^*$,

$$IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) \leq IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1^*, \mathfrak{R}_2^*, \dots, \mathfrak{R}_n^*).$$

Proof. Since $\mathfrak{R}_i \leq \mathfrak{R}_i^*$ for all i , then we can write;

• if $\mu_{\sigma(i)}^- \leq \mu_{\sigma(i)}^{*-}$;

$$\begin{aligned} & (\mu_{\sigma(i)}^-)^q \leq (\mu_{\sigma(i)}^{*-})^q \\ & 1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q \geq 1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*-})^q \\ & (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \geq (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*-})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ & \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \geq \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*-})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ & (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}} \leq \\ & (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*-})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

• if $\mu_{\sigma(i)}^+ \leq \mu_{\sigma(i)}^{*+}$;

$$\begin{aligned} & (\mu_{\sigma(i)}^+)^q \leq (\mu_{\sigma(i)}^{*+})^q \\ & 1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q \geq 1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*+})^q \\ & (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \geq (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*+})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ & \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \geq \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*+})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ & (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}} \leq \\ & (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^{*+})^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

- if $v_{\sigma(i)}^- \geq v_{\sigma(i)}^{*-}$;

$$\begin{aligned} (v_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} &\geq (v_{\sigma(i)}^{*-})^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} &\geq \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^{*-})^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} \end{aligned}$$

- if $v_{\sigma(i)}^+ \geq v_{\sigma(i)}^{*+}$;

$$\begin{aligned} (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} &\geq (v_{\sigma(i)}^{*+})^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} \\ \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} &\geq \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^{*+})^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))} \end{aligned}$$

the proof is completed.

Theorem 4.5 (Boundedness) Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, v_i): \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], v_i = [v_i^-, v_i^+]\}$, in this statement,

$$\min\{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n\} \leq IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) \leq \max\{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n\}.$$

Proof. Firstly, we know that

$$\begin{aligned} &= \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \min(\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - \max(\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

and from here;

$$\begin{aligned} &= \left(1 - (1 - \min(\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \\ &\leq \left(1 - (1 - \max(\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \end{aligned}$$

$$\text{thus, } \min(\mu_{\sigma(i)}^-) \leq \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)})-\mu(A_{\sigma(i-1)}))}\right)^{\frac{1}{q}} \leq \max(\mu_{\sigma(i)}^-).$$

Similarly,

$$\begin{aligned}
 &= (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \min(\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}} \\
 &\leq (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}} \\
 &\leq (1 - \prod_{i=1}^n (1 - \max(\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}}
 \end{aligned}$$

and from here

$$\begin{aligned}
 &= (1 - (1 - \min(\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}} \\
 &\leq (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}} \\
 &\leq (1 - (1 - \max(\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}}
 \end{aligned}$$

thus, $\min(\mu_{\sigma(i)}^+) \leq (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_{\sigma(i)}^+)^q)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})})^{\frac{1}{q}} \leq \max(\mu_{\sigma(i)}^+)$.

From other hand,

$$\begin{aligned}
 &\prod_{i=1}^n \min(v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \leq \\
 &\prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \leq \\
 &\prod_{i=1}^n \max(v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})}
 \end{aligned}$$

and from here

$$\begin{aligned}
 &\min(v_{\sigma(i)}^-)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))} \leq \\
 &\prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \leq \\
 &\max(v_{\sigma(i)}^-)^{\sum_{i=1}^n (\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))}
 \end{aligned}$$

thus, $\min(v_{\sigma(i)}^-) \leq \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^-)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \leq \max(v_{\sigma(i)}^-)$. Similarly,

thus, $\min(v_{\sigma(i)}^+) \leq \prod_{i=1}^n (v_{\sigma(i)}^+)^{\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})} \leq \max(v_{\sigma(i)}^+)$

and IVq-ROHFCA carries Boundedness property.

Now, we discuss some special cases of IVq-ROHFCA as follow.

- If $q = 1$, IVq-ROHFCA is reduced to Interval valued intuitionistic hesitant choquet integral averaging operator (IVIHCA).
- If $q = 2$, IVq-ROHFCA is reduced to Interval valued Pythagorean hesitant choquet integral averaging operator (IVPHCA).
- If $\mu(\{x_{\sigma(i)}\}) = \mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$, IVq-ROHFCA is reduced to Interval valued q-rung orthopair hesitant weighted averaging operator (IVq-ROHWA).
- If $\mu(A) = \sum_{i=1}^{|A|} w_i$ for all $A \in X$ where $|A|$ indicates number of elements in A and $w_i = \mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$ also $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ and $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, in this statement IVq-ROHFCA is reduced to Interval valued q-rung orthopair hesitant ordered weighted averaging operator (IVq-ROHOWA).

Definition 4.6 Let determine collection of IVq-ROHFSs that $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i) : \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu_i = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$ where $(i = 1, 2, \dots, n)$ and $\sigma(i)$ indicates to a permutation of $1, 2, \dots, n$ such that $\mathfrak{R}_{\sigma(1)} \geq \mathfrak{R}_{\sigma(2)} \geq \dots \geq \mathfrak{R}_{\sigma(n)}$ and $\mathfrak{R}_{\sigma(0)} = \emptyset$ in here, Interval valued q- rung orthopair hesitant fuzzy Choquet integral geometric operator (IVq-ROHF CG) is defined as follow;

$$\begin{aligned}
 &IVq - ROHF CG(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) \\
 &= \{([\prod_{i=1}^n (\mu_{\sigma(i)}^-)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))}), \prod_{i=1}^n (\mu_{\sigma(i)}^+)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})], \\
 &[(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\nu_{\sigma(i)}^-)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}}, (1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\nu_{\sigma(i)}^+)^q)^{(\mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)}))})^{\frac{1}{q}}]\}
 \end{aligned}$$

Theorem 4.7 Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i) : \mu = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$ and $\sigma(i)$ indicates to a permutation of $1, 2, \dots, n$ such that $\mathfrak{R}_{\sigma(1)} \geq \mathfrak{R}_{\sigma(2)} \geq \dots \geq \mathfrak{R}_{\sigma(n)}$ and $\mathfrak{R}_{\sigma(0)} = \emptyset$. $\mathfrak{R}_{\sigma(i)}$ is the i th largest element of \mathfrak{R}_i and their aggregated value is still IVq-ROHF.

Proof. It can be made as similarity to Theorem 4.2. IVq-ROHF CG provides following properties.

Theorem 4.8 (idempotency) Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i) : \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu_i = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$ and $\mathfrak{R}_i = \mathfrak{R}$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$. Thus, $IVq - ROHF CG(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) = \mathfrak{R}$.

Theorem 4.9 (Monotonicity) If $\mathfrak{R}_i > \mathfrak{R}_i^*$,

$$IVq - ROHF CG(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) \leq IVq - ROHF CG(\mathfrak{R}_1^*, \mathfrak{R}_2^*, \dots, \mathfrak{R}_n^*).$$

Theorem 4.10 (Boundedness) Let accept collection of $\mathfrak{R}_i = \{(\mu_i, \nu_i) : \mu_i = [\mu_i^-, \mu_i^+], \nu_i = [\nu_i^-, \nu_i^+]\}$, in this statement,

$$\min\{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n\} \leq IVq - ROHF CG(\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n) \leq \max\{\mathfrak{R}_1, \mathfrak{R}_2, \dots, \mathfrak{R}_n\}.$$

Now, we discuss some special cases of IVq-ROHF CG of follow.

- If $q = 1$, IVq-ROHFCG is reduced to Interval valued intuitionistic hesitant choquet integral geometric operator (IVIHCG).
- If $q = 2$, IVq-ROHFCG is reduced to Interval valued Pythagorean hesitant choquet integral geometric operator (IVPHCG).
- If $\mu(\{x_{\sigma(i)}\}) = \mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$, IVq-ROHFCG is reduced to Interval valued q-rung orthopair hesitant weighted geometric operator (IVq-ROHWG).
- If $\mu(A) = \sum_{i=1}^{|A|} w_i$ for all $A \in X$ where $|A|$ indicates number of elements in A and $w_i = \mu(A_{\sigma(i)}) - \mu(A_{\sigma(i-1)})$ for $(i = 1, 2, \dots, n)$ also $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ and $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, in this statement IVq-ROHFCG is reduced to Interval valued q-rung orthopair hesitant ordered weighted geometric operator (IVq-ROHOWG).

5. AN APPLICATION OF MULTI-ATTRIBUTE DECISION-MAKING METHOD UNDER IVQ-ROHFS

In this section, we apply the presented Interval Valued q- Rung Orthopair Hesitant fuzzy averaging, geometric operators into an algorithm and test over a MCDM problem with n alternatives and m criteria to indicate effective of aggregating operators over IVq-ROHFS. Let $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ be a set of alternatives, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ be a set of criterions. Then, the following steps have been defined for algorithm. Firstly, experts consist of a matrix according to their own ideas. Then, fuzzy measures are calculated by using Def. 3.4. and obtained values are converted through of *IVq - ROHFCA*. Then, score values are determined and ranked.

1. Define Decision making matrix as $(\mathfrak{R}_{ij})_{m \times n} = \{(\mu, \nu): \mu = [\mu_{ij}^-, \mu_{ij}^+], \nu = [\nu_{ij}^-, \nu_{ij}^+]\}$ for $i = 1, 2, \dots, m$

and $j = 1, 2, \dots, n$,

2. Confirm Fuzzy measures for m attributes,

3. Calculate Interval Valued q- Rung Orthopair Hesitant fuzzy elements by utilizing $\mathfrak{R}_i = IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_{i1}, \mathfrak{R}_{i2}, \dots, \mathfrak{R}_{in})_g$ or $\mathfrak{R}_i = IVq - ROHFCG(\mathfrak{R}_{i1}, \mathfrak{R}_{i2}, \dots, \mathfrak{R}_{in})$ for $i = 1, 2, \dots, m$

4. Consist of score values of IVq-ROHF elements,

5. Determine alternatives rankings in descending order.

Numerical example

In this section, we adopt an example over Interval valued intuitionistic hesitant fuzzy sets [43] and solve by utilizing the above defined averaging operator over IVq-ROHFS. In here, a committee of experts think to take a project manager and the committee determines three criterions $C_i (i = 1, 2, 3)$ as follow;

1. knowledge; Does he/she have previous experience or background about this job?

2. reliability; The reliability is important for business because of nobody wants to work with a noreliability person.

3. demanding; The demanding is essential for busineses. If not demanding into mood of worker, the busineses losts its future

and four candidates $A_i (i = 1, 2, 3, 4)$ apply for this position;

Decision makers determine decision making matrix according to their experiences, ideas as follow in Table 1.

Table 1. Evaluations of alternatives made by decision makers

| | C_1 | C_2 |
|-------|--|--|
| A_1 | {⟨[0.7,0.9], [0.1,0.1]⟩, ⟨[0.6,0.8], [0.1,0.2]⟩, ⟨[0.3,0.4], [0.6,0.6]⟩} | {⟨[0.5,0.6], [0.2,0.3]⟩, ⟨[0.1,0.1], [0.8,0.9]⟩} |
| A_2 | {⟨[0.2,0.3], [0.5,0.6]⟩} | {⟨[0.1,0.3], [0.6,0.6]⟩} |
| A_3 | {⟨[0.3,0.5], [0.4,0.5]⟩} | {⟨[0.8,0.9], [0.1,0.1]⟩, ⟨[0.5,0.5], [0.1,0.2]⟩} |
| A_4 | {⟨[0.2,0.4], [0.3,0.5]⟩, ⟨[0.5,0.7], [0.1,0.2]⟩} | {⟨[0.1,0.1], [0.7,0.9]⟩} |
| | C_3 | |
| | {⟨[0.8,0.9], [0.1,0.1]⟩} | |
| | {⟨[0.3,0.4], [0.4,0.6]⟩, ⟨[0.5,0.6], [0.4,0.5]⟩} | |
| | {⟨[0.2,0.3], [0.5,0.6]⟩, ⟨[0.1,0.3], [0.6,0.6]⟩} | |
| | {⟨[0.1,0.3], [0.6,0.7]⟩, ⟨[0.2,0.2], [0.7,0.8]⟩, ⟨[0.3,0.4], [0.6,0.6]⟩} | |

Determine fuzzy measures of n attributes. Suppose fuzzy measures as follow; $\mu(C_1) = 0.4$, $\mu(C_2) = 0.3$ and $\mu(C_3) = 0.4$ in this statement $\lambda = 0.5$ is obtained by Definition 3.5 and thus $\mu(C_1, C_2) = 0.76$, $\mu(C_1, C_3) = 0.88$, $\mu(C_2, C_3) = 0.76$ and $\mu(C_1, C_2, C_3) = 1$.

Calculate a new permutation with helping to score function for $q = 1$ and reorder elements of decision making matrix, and aggregate based on IVq-ROHFCA as below;

$$\mathfrak{R}_1 = IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_{11}, \mathfrak{R}_{12}, \mathfrak{R}_{13})$$

$$= \{ \langle [0.7504, 0.8941], [0.0895, 0.0987] \rangle, \langle [0.7134, 0.8524], [0.0895, 0.1377] \rangle, \langle [0.6251, 0.7499], [0.2117, 0.2333] \rangle, \langle [0.7126, 0.8714], [0.1249, 0.1285] \rangle, \langle [0.6700, 0.8207], [0.1249, 0.1792] \rangle, \langle [0.5684, 0.6962], [0.2952, 0.3037] \rangle \}$$

$$\mathfrak{R}_2 = IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_{21}, \mathfrak{R}_{22}, \mathfrak{R}_{23})$$

$$= \{ \langle [0.2404, 0.3694], [0.4396, 0.5643] \rangle, \langle [0.3361, 0.4638], [0.4396, 0.5246] \rangle, \langle [0.1988, 0.3293], [0.4396, 0.5246] \rangle \}$$

$$[0.4806, 0.5643])$$

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}_3 &= IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_{31}, \mathfrak{R}_{32}, \mathfrak{R}_{33}) \\ &= \{([0.5804, 0.7379], [0.2171, 0.2525]), ([0.3946, 0.5933], [0.2171, 0.3331]), ([0.5684, 0.7379], \\ &[0.2268, 0.2525]), ([0.3773, 0.5933], [0.2268, 0.3331]), ([0.5684, 0.7379], [0.2268, 0.2620]), \\ &([0.3773, 0.5933], [0.2268, 0.3457])\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} < \\ \mathfrak{R}_4 &= IVq - ROHFCA(\mathfrak{R}_{41}, \mathfrak{R}_{42}, \mathfrak{R}_{43}) \\ &= \{([0.1522, 0.3302], [0.4437, 0.6226]), ([0.2975, 0.1783], [0.2859, 0.4315]), ([0.1988, 0.2858], \\ &[0.4778, 0.6638]), ([0.3361, 0.4588], [0.3079, 0.4601]), ([0.2485, 0.3779], [0.4437, 0.5782]), \\ &([0.3773, 0.5286], [0.2859, 0.4008])\} \end{aligned}$$

If we utilize score function over IVq-ROHFS to aggregate attribute values, then the scores of alternatives are found;

$$S(\mathfrak{R}_1) = 0.5756461, \quad S(\mathfrak{R}_2) = -0.179201534, \quad S(\mathfrak{R}_3) = 0.311660828 \quad \text{and} \\ S(\mathfrak{R}_4) = -0.136024305. \text{ Thus, this means that ordering of candidates } A_1 > A_3 > A_4 > A_2.$$

In here, we only give for $q = 1$ and Table 2 is obtained by using Def 3.3. score values and ranking alternatives for $q = 2, 3, 5, 7, 10, 15$ as follow;

Table 2. Ranking alternatives of Score Function Values under IVq-ROHFCA

| different parameters | Score function | Ranking Alternatives |
|----------------------|---|-------------------------|
| $q = 2$ | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.53925, S(\mathfrak{R}_2) = -0.15598,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0.28806, S(\mathfrak{R}_4) = -0.07662$ | $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| $q = 3$ | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.44818, S(\mathfrak{R}_2) = -0.08682,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0.22676, S(\mathfrak{R}_4) = -0.04145$ | $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| $q = 5$ | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.30643, S(\mathfrak{R}_2) = -0.02606,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0.13797, S(\mathfrak{R}_4) = -0.01008$ | $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| $q = 7$ | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.21751, S(\mathfrak{R}_2) = -0.00731,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0,09052, S(\mathfrak{R}_4) = -0,00182$ | $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| $q = 10$ | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.00968, S(\mathfrak{R}_2) = 0.00178,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0.01124, S(\mathfrak{R}_4) = 0.01192$ | $A_4 > A_3 > A_1 > A_2$ |

If the table is surveyed, the best alternative is A_1 and the worst alternative is A_2 for all values of q out $q = 10$ under IVq-ROHFCA. For $q = 10$, the best alternative is A_4 , if the worst alternative, it is agreement with the other results. This statement indicates that our proposed cluster and method are agreement, reality, flexible approach according to IVIHFCI because while IVIHFCI is being surveyed for $q = 1$, our proposed cluster proposes an approach changing according to need, prefer, requirement of decision makers by including different values.

6. COMPARATIVE AND DISCUSSION

In this section, we discuss the highlighting of IVq-ROHFCA in decision making. To do so, the proposed aggregating operator is compared with correlation coefficient of IVPHFSs [47], IVPHFWA [44], IVPHFWG [44], GIVPHFWA [44] and GIVPHFWG [44]. Firstly, we change some values of above decision making matrix and redesign as follow;

If the above values are carefully surveyed, it is open that $0.8^2 + 0.7^2 > 1$ and thus the compared operators do not propose solution for the defined decision making matrix;

Table 4: Ranking alternatives of Score Function Values under IVq-ROHFCA

| Different methods | Score value | Ranking Alternatives |
|------------------------|---|-------------------------|
| Zheng et al. [47] | Null* | not ordering** |
| IVPHFWA [44] | Null* | not ordering** |
| IVPHFWG [44] | Null* | not ordering** |
| GIVPHFWA [44] | Null* | not ordering** |
| GIVPHFWG [44] | Null* | not ordering** |
| IVq-ROHFCA ($q = 3$) | $S(\mathfrak{R}_1) = 0.46612,$ $S(\mathfrak{R}_2) = -0.06397,$ $S(\mathfrak{R}_3) = 0.23579,$ $S(\mathfrak{R}_4) = -0,00737$ | $A_1 > A_3 > A_4 > A_2$ |
| IVq-ROHFCG ($q = 3$) | $S(\mathfrak{R}_1) = -0.04283,$ $S(\mathfrak{R}_2) = -0.20775,$ $S(\mathfrak{R}_3) = -0.05056,$ $S(\mathfrak{R}_4) = -0.31569$ | $A_1 > A_3 > A_2 > A_4$ |

7. CONCLUSION

The changeable constructions according to need, prefer, requirement have presented a possibility to give more objective decisions for decision makers. Therefore, q -Rung Orthopair fuzzy sets (q -ROFs) defined as generalized intuitionistic fuzzy sets have been produced by Yager [35]. In this paper, we propose interval valued q -rung orthopair hesitant fuzzy set (IV q -ROHFS) by combining interval hesitant fuzzy sets and q -ROFs with motivation of Interval valued pythagorean Hesitant fuzzy sets (IVPHFS). This cluster is essential with respect to including more data, flexible construction, presenting of several clusters into its own construction especially for MCDM problems. Then, we present some basic concepts of IV q -ROHFS like complement, union, intersection, addition, multiply, scalar multiplication, scalar power and a score function to determine large and small relationship between two IV q -ROHFes. After then, Interval valued q -rung orthopair hesitant fuzzy Choquet integral has been developed by combining the soft construction of IV q -ROHFS and choquet integral and this concept has been integrated with aggregation operators from here obtained some structures as called Interval valued q -rung orthopair hesitant fuzzy Choquet averaging operator (IV q -ROHCA) and Interval valued q -rung orthopair hesitant fuzzy Choquet geometric operator (IV q -ROHCG). In addition to, an example has been given adopted from Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy sets (IVIHFS) to indicate effective, realistic, flexible of method. Our results are agreement when compared with this method based on TOPSIS but have more advantages. The calculated values for $q = 1$ show that our approach is IVIHFS [43], for $q = 2$, it is IVPHFS [44], for $q = 3$, it is interval valued cubic hesitant fuzzy sets (IVCHFS). This statement eliminates to error margin because of comparative analysis in its own. Flexible structure changing according to the prefer, requirement, need of experts will provide to eliminate non-objective comments. Finally, we offer a comparative analysis and change some values in decision making matrix and compare with some papers over IVPHFS. Besides, this manuscript can be utilized to construct several basic constructions like Hamacher aggregation operators, Prioritized Aggregation Operators, Geometric hybrid operators, Power aggregation operator so on and also some the basic measures like Hamming, Housdorff, Euclidean, correlation coefficient, similarity measures.

Declaration of Ethical Code

In this study, we undertake that all the rules required to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" are complied with, and that none of the actions stated under the heading "Actions Against Scientific Research and Publication Ethics" are not carried out.

REFERENCES

- [1] Zadeh, L .A. (1965). Fuzzy sets, *Information Control*, 8, 338-353.
- [2] Atanassov, K.T. (1986). Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets Syst.* 20(1), 87-96.
- [3] Yager, R.R. (2014). Pythagorean membership grades in multi-criteria decision making. *IEEE Trans Fuzzy Syst.* 22 , 958-965.
- [4] Torra, V., Narukawa, Y. (2009). On hesitant fuzzy sets and decision. In: *The 18th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. Jeju Island, Korea, 1378-1382.
- [5] Torra, V. (2010). Hesitant fuzzy sets, *Int J Intell Syst.* 25 , 529-539.
- [6] Atanassov, K., Gargov, G., (1989). Interval-valued intuitionistic fuzzy sets, *Fuzzy Sets Syst.*, 31, 343-349.
- [7] Chen, T.Y. (2007). A note on distances between intuitionistic fuzzy sets and/or interval-valued fuzzy sets based on the Hausdorff metric. *Fuzzy Set Syst.*, 158(22) , 2523-2525.
- [8] Chen, S.M., Chang, C.H. (2015). A novel similarity measure between Atanassov's intuitionistic fuzzy sets based on transformation techniques with applications to pattern recognition. *Inf Sci*, 291, 96-114.
- [9] Guo, K.H., Song, Q. (2014). On the entropy for Atanassov's intuitionistic fuzzy sets: An interpretation from the perspective of amount of knowledge. *Appl Soft Comput*, 24, 328-340.
- [10] Xu, Z., Yager, R.R. (2006). Some geometric aggregation operators based on intuitionistic fuzzy sets. *Int J Gen Syst.* ,35(4), 417-433.
- [11] Xu, Z. (2007). Intuitionistic fuzzy aggregation operators. *IEEE Trans Fuzzy Syst.*15(6), 1179-1187.
- [12] Liu, D., Chen, X., Peng, D. (2018). The intuitionistic fuzzy linguistic cosine similarity measure and its application in pattern recognition. *Complexity.*, 1-11.
- [13] Park, J.H., Park, Y., Kwun, Y.C., Tan, X. (2011). Extension of TOPSIS method for decision making problems under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Applied Mathematical Modelling*, 35, 2544-2556.
- [14] Tan, C., Zhang, Q. (2006). Fuzzy multiple attribute decision making based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets. In *Proceedings IEEE international conference on system, man and cybernetics*, 1404–1407.
- [15] Yager, R.R., Abbasov, A.M. (2013). Pythagorean membership grades, complex numbers and decision making. *Int J Intell Syst.*, 28, 436-452.
- [16] Yager, R.R., (2014). Pythagorean membership grades in multi-criteria decision making. *IEEE Trans Fuzzy Syst* 22, 958-965.
- [17] Peng, X., Yang, Y. (2015). Some results for Pythagorean fuzzy sets. *Int J Intell Syst.*, 30(11), 1133-1160.
- [18] Garg, H. (2016). A novel correlation coefficients between Pythagorean fuzzy sets and its applications to decision making processes. *Int J Intell Syst.*, 31(12), 1234-1252.

- [19] Garg H A (2016). new generalized Pythagorean fuzzy information aggregation using Einstein operations and its application to decision making. *Int J Intell Syst.*, 31(9), 886-920.
- [20] Zeng, S., Chen, J., Li, X. (2016). A hybrid method for Pythagorean fuzzy multiple criteria decision making. *Int J Inf Technol. Decision Making.* 15(02), 403-422.
- [21] Wei, G., Lu, M. (2018). Pythagorean fuzzy power aggregation operators in multiple attribute decision making. *Int J Intell Syst.*, 33(1), 169-186.
- [22] Zhu, B., Xu, Z.S. Xia, M.M. (2011). Dual hesitant fuzzy sets., *J. Appl. Math.*, 201, 2607-2645.
- [23] Qian, G., Wang, H., Feng, X.Q. (2013). Generalized hesitant fuzzy sets and their application in decision support system. *Knowl. Based Syst.* 37, 357-365.
- [24] Yu, D.J.,(2013). Triangular hesitant fuzzy set and its application to teaching quality evaluation. *J. Inf. Comput. Sci.* 10(7), 1925-1934.
- [25] Peng, J.J., Wang, J.Q., Wang, J., Yang, L.J., Chen, X.H., (2015). An extension of ELECTRE to multi-criteria decision-making problems with multi-hesitant fuzzy sets. *Inf Sci* 307, 113-126.
- [26] Khan, M.S.A., Abdullah, S., Ali, A., N. Siddiqui Amin, F. (2017). Pythagorean hesitant fuzzy sets and their application to group decision making with incomplete weight information. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 33(6), 3971-3985.
- [27] Wei, G.W., Lu, M. (2017). Dual hesitant Pythagorean fuzzy Hamacher aggregation operators in multiple attribute decision making. *Arch Control Sci.*, 27(3), 365-395.
- [28] Tang, X., Wei, G.W., (2019). Multiple Attribute Decision-Making with Dual Hesitant Pythagorean Fuzzy Information, *Cognitive Computation*, 11, 193-211.
- [29] Khan, M.S.A., Abdullah, S., Ali, A., Rahman, K. (2020). Pythagorean hesitant fuzzy information aggregation and their application to multi attribute group decision-making problems. *J. Intell. Syst.* 29(1), 154-171.
- [30] Khan, M.S.A., Ali, M.Y., Abdullah, S.I., Hussain, I., Farooq, M. (2018). Extension of TOPSIS method based on Choquet integral under interval-valued Pythagorean fuzzy environment. *Intell Fuzzy Syst* 34, 267-282.
- [31] Khan, M.S.A., Abdullah, S., Ali, A., Amin, F., Hussain, F. (2019). Pythagorean hesitant fuzzy Choquet integral aggregation operators and their application to multi- attribute decision-making, *Soft Computing*, 23, 251-267.
- [32] Xu, Z.S. (2010). Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information. *Inf Sci.*, 180, 726-736.
- [33] Peng, X., Yang, Y. (2016). Pythagorean fuzzy Choquet integral based MABAC method for multiple attribute group decision making. *Int J Intell Sys.*, 31 , 989-1020.
- [34] Tan, C.Q., Chen, X.H. (2011). Intuitionistic fuzzy Choquet integral operator for multi criteria decision making *Int J Intell Sys.*, 26, 659-686.
- [35] Yager, R.R. (2016). Generalized Orthopair Fuzzy Sets. *IEEE Trans Fuzzy Syst.* 27, 1353-1365.

- [36] Liu, P., Wang, P. (2018). Some q-rung orthopair fuzzy aggregation operators and their applications to multiple-attribute decision making. *Int J Intell Syst* 33(2), 259-280.
- [37] Liu, P., Liu, J., (2018). Some q-rung orthopair fuzzy Bonferroni mean operators and their application to multi-attribute group decision making. *Int J Intell Syst* 33(2) , 315–347.
- [38] Wang, J., Wei, G., Lu, J., Alsaadi, F.E., Hayat, T., Wei, C., Zhang, Y. (2019). Some q-rung orthopair fuzzy Hamy mean operators in multiple attribute decision-making and their application to enter prise resource planning systems selection. *Int J Intell Syst* 34(10), 2429-2458.
- [39] Wei, G., Wei, C., Wang, J., Gaoh, W. Y. (2019). Some q-rung orthopair fuzzy Maclaurin symmetric mean operators and their applications to potential evaluation of emerging technology commercialization. *Int J Intell Syst* 34(1), 50-81.
- [40] Joshi, B.P., Singh, A., Bhatt, P.K. and Vaisla, K.S. (2018). Interval valued q-rung orthopair fuzzy sets and their properties, *J. Intell Syst* 35(5), 5225-5230.
- [41] Wang, J., Zhang, R., Zhu, X., Zhou, Z., Shang, X., Li, W. (2019). Some q-rung orthopair fuzzy Muirhead means with their application to multi-attribute group decision making. *J Intell Fuzzy Syst* 36(2), 1599-1614.
- [42] Liu, P., Liu, W., (2019). Multiple-attribute group decision-making method of linguistic q-rung orthopair fuzzy power Muirhead mean operators based on entropy weight. *Int J Intell Syst* 34(8), 1755-1794.
- [43] Joshi, D., Kumar, S. (2016). Interval valued intuitionistic hesitant fuzzy choquet integral based TOPSIS method for multi criteria group decision making, *European Journal of operational Research*, 248, 183-191.
- [44] Zhang, M., Zheng, T., Zheng, W., Zhaou, L., (2020). Interval valued Pythagorean hesitant fuzzy set and Its application to Multiattribute Group Decision Making, *Complexity*, ID:1724943, 26 pages. DOI:<https://doi.org/10.1155/2020/1724943>.
- [45] Sugeno, M. Theory of fuzzy integral and its application (Doctoral dissertation) Tokyo Institute of Technology.
- [46] Grabisch, M., Nguyen, H.T., Walker, E.A., (1995). Fuzzy measures and integrals, In *fundamentals of uncertainty calculi with applications to inference*, Springer Neth 78, 563-604.
- [47] Zheng, T., Zhang, M., Li, L., Wu, Q., Zhaou, L. (2020). Correlation coefficients of Interval valued pythagorean hesitant fuzzy set and their applications, *IEEE* 38 1472-1483.



The Attitude of ZnO/Al₂O₃ Film Produced by Ultrasonic Spray Pyrolysis under Thermal Annealing

Meryem POLAT GONULLU^{1,*} Damla Dilara CAKIL Cemil CETINKAYA

¹Gazi University Faculty of Technology, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Article Info

Research article
Received: 30.06.2022
Revision: 10.09.2022
Accepted: 24.09.2022

Keywords

ZnO
Al₂O₃
Bilayer films
Spray Pyrolysis
Thermal annealing
Characterization

Abstract

Impact of annealing on structural, morphological, elemental, electrical, and optical properties of bilayer ZnO/Al₂O₃ films has been investigated. Bilayer films have been deposited on microscope slides by ultrasonic spray pyrolysis method at 350°C substrate temperature. Then, those films have been annealed at 400°C, 500°C, and 600°C under atmospheric conditions, respectively. Structural analysis has revealed that bilayer films have polycrystalline with hexagonal wurtzite structures of ZnO. Also, there is no other structures have been found like Zn-Al, etc. Morphological and elemental analyses have been presented that the alterations of surface, and diffusions of Al to ZnO layer. Cross-sectional images have revealed the film thicknesses are between 0.78-1.56 µm. Resistivity values of the films have been obtained between 6.78x10¹ ohm-cm to 3.29 x10¹ ohm-cm. Optical method has been used for the calculation of optical band gap values of the films which are found between 3.17-3.25 eV. The results have revealed that annealing leads to diffusion from the bottom layer of Al₂O₃ of the material to the upper layer, ZnO. In addition, the properties of ZnO/Al₂O₃ films are still the focus of researchers.

1. INTRODUCTION

Bilayers or otherwise known as “laminates” at nano or micro scale films come out of alternating layers as metal oxides [1]. This layer-by-layer structured film design reveals unique properties according to single-layer film structures like electrical, optical, morphological, and photocatalytic properties. Each layer can have a specific thickness that arranges the film behavior. This bilayer film structure consists of different metal oxides like ZnO, ZnS, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CuO, etc, and can be used in many application areas like optoelectronic devices, solar cells, photocatalysis as a result of the unique properties of each structure [5-9]. In particular, bilayer films combined with these metal oxides are intended for use in optoelectronic applications. Among them, bilayer structures consisting of ZnO and Al₂O₃ layers have been attracting attention, recently [10-13]. Due to the optical properties like high transparency of ZnO and high specific surface area of Al₂O₃ layers, ZnO/Al₂O₃ bilayer/laminate films are especially useful for optical coatings [14, 15].

ZnO/Al₂O₃ bilayer films and derivatives can be produced by many techniques such as chemical vapor deposition (CVD), atomic layer deposition (ALD), sol-gel dip coating, and ultrasonic spray pyrolysis (USP) techniques [16-22]. However, production of bilayer ZnO/Al₂O₃ has been studied by few works and few production methods [23-26]. Ultrasonic spray pyrolysis is a low-cost, easy-used technique that enables to production of homogeneous films on different types of substrates in large areas. Also, this technique does not require vacuum, which is a great advantage. Adjustable production parameters like molarity of spraying solution chemicals, the flow rate of spraying, solutions, type of solvents such as alcohol and/or pure water, substrate temperature, and configurable spraying nozzle to substrate distance are other advantages of USP technique. However, the possibility of layered film production with USP and the fact that the studies in this

field are quite up-to-date and few contribute to the originality of the research to be conducted in the related field [27, 28].

In general, research is focused on the production and characterizations of optoelectronic, morphologic, and electrical properties of layered films by combining metal oxides. However, it is well known that annealing has great effects on layered film properties as in single-layered films. The crystallinity level, crystallite sizes, dislocations, and phase transformations may occur in the structure after the annealing process [2, 29]. According to production parameters like temperatures, chemicals, type of solvent, etc., it is well known that the crystallization of ZnO can occur at different phases with the effect of annealing while Al₂O₃ needs higher production temperatures [30-32].

Despite the importance of layer-by-layer films in optoelectronic applications, no study focusing on the investigation of some physical properties of “annealed double-layer films produced by ultrasonic spray pyrolysis” has been encountered so far. Hence, the present work focuses on investigating and determining the effect of annealing on structural, morphological, elemental, and optical alterations of bilayer ZnO/Al₂O₃ film produced by USP technique.

2.MATERIALS AND METHODS

Ultrasonic spray pyrolysis technique has been used for the production of ZnO/Al₂O₃ bilayer films on microscope slides. Glass substrates have been cleaned with detergent, ultra-pure water ($\rho \geq 15 \text{ M}\Omega\text{cm}$), and ethanol before the film production, respectively. 0.1 M Zn[(CH₃COO)₂Zn.2H₂O] (purity $\geq 99.999\%$, Sigma Aldrich) and Al(NO₃)₃.9H₂O (purity $\geq 98\%$, Sigma Aldrich) have been used as a chemical source of spraying solution in ultra-pure water. These chemical solutions have been stirred for 30 minutes at room temperature and sprayed onto 350°C preheated microscope slide substrates, respectively. To create a bilayer structure, firstly, the aluminum solution has been sprayed onto microscope slides. Then, the zinc solution has been sprayed on the first/bottom layer that cooled down, in order to grow the ZnO layer. Flow rate of the solutions has been kept at 5 ml/min and controlled by a flowmeter during the spraying. Also, for 30 minutes using an ultrasonic nozzle total of 150 ml of starting solutions have been sprayed for each layer under the 1 bar air pressure as a carrier gas. After the bilayer film production, ZnO/Al₂O₃ film have been annealed at 400°C, 500°C, and 600°C, respectively in an atmosphere-controlled furnace.

The structural alterations of as-deposited and annealed ZnO/Al₂O₃ films have been studied by using Bruker D8 Advanced diffractometer (XRD) with CuK _{α} (1.5418 Å) radiation in the $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ range. The surface morphology, cross-sectional images with film thicknesses, and changes in the elemental distributions have been investigated by Jeol JSM 6060LV scanning electron microscope (SEM) and Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDX, IXRF system). Optical properties have been analyzed by Shimadzu UV-Visible model 2600 spectrophotometer in the range of 200 nm to 800 nm. Optical band gap values of all films have been obtained by an optical method. The resistivity measurements have been performed via van der Pauw method with square-shaped (1x1 mm²) samples and ohmic contacts in the corner. Electrical contacts have been used for confirming the ohmic behavior by the current-voltage characteristics. The measurements have been made at room temperatures using Lakeshore Hall effect measurement system (HMS). The data have been analyzed using the QMSA technique. For simplicity, the films are coded as Z/A-As, Z/A-400, Z/A-500, and Z/A-600 according to the as-deposition and annealing temperature.

3.RESULTS AND DISCUSSION

XRD graphs of bilayer Z/A-As, and annealed Z/A-400, Z/A-500, and Z/A-600 films have been shown in Fig.1. XRD graphs present several diffractions at different intensities (remarked with a line equal to 1000 counts) that are well matched with the peaks related to the ZnO (ICDD: 36-1451). These several diffractions show the polycrystalline nature of the films. However, no diffraction belonging to the Al phases has been seen in the XRD pattern that is related to its crystallization behavior at high temperatures. Peaks specified diffracted from (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), and (201) planes present the hexagonal wurtzite structure of ZnO. Research in the literature made by Tuzemen et.al. has presented almost a similar behavior for the crystallization of ZnO structure on Al₂O₃ coated glass substrates by RF magnetron sputter technique [14].

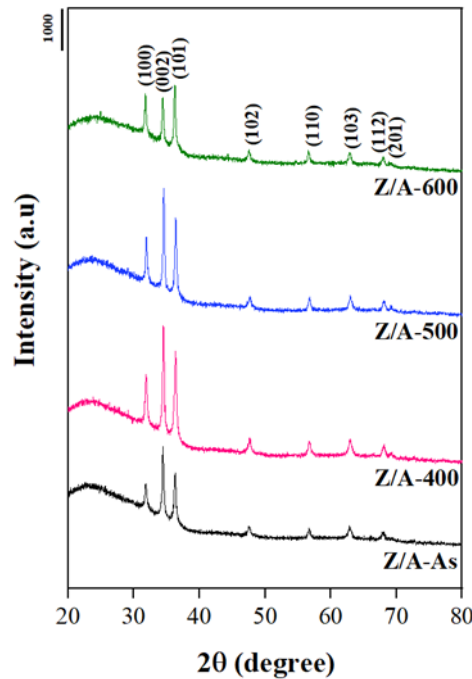


Figure 1. XRD patterns of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

From Table 1, it can be seen that the diffraction angles (2θ), intensities (I), interplanar spacing (d) with ICDD values, and β (full width half maximum) values of three intense diffraction peaks that present the alterations in the crystal structure according to annealing temperature. Among the three most intense peaks, the (002) diffraction plane has a higher crystallinity level after the as-deposited ZnO/Al₂O₃ film has been annealed at 400°C. However, all peaks exhibit the increasing peak intensity that indicates the improving crystal quality with the effect of annealing at 400°C. After the annealing temperature reaches 500°C, bilayer film presents almost the same crystalline behavior although the decreasing peak intensities. Nevertheless, when the annealing temperature reaches 600°C, the dominance of (101) diffraction plane increased and changes the crystal structure. In Table 2, the data such as texture coefficient (P), the crystallite size (D), and dislocation density (δ) values related to three major peaks have been given as a result of the mathematical calculations [33-35], and explanations on the subject are brought in below.

As seen in Table 2, calculations have revealed that Z/A-As, Z/A-400, and Z/A-500 films present the preferential orientation (P) remarked with bold type, through the (002) diffraction plane. When the bilayer Z/A-As film was annealed at 600°C, a sudden change occurred, and preferential orientation transform to the dominant growth directions through the (100) and (002) planes. These type changes indicate the co-growth of different phases in the crystal structure after the annealing process of bilayer film at 600°C. It can be seen from Table 2 that the crystallite sizes (D) have been changed between 31-39 nm that presenting the fluctuations in the crystallite sizes as a result of annealing. In another word, annealing at 400°C has caused a decrease to 34.83 nm in crystallite size while annealing at 500°C has caused an increase to 37.33 nm, and also at 600°C a decrease again to 31.52 nm. These fluctuations of crystallite sizes indicate the variable grain boundaries and so the number of defects in the film structure.

Table 1. Structural parameters of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

| Sample | Miller Indices | 2 θ (°) | 2 θ_0 (°) | I | I ₀ | d (Å) | d ₀ (Å) | β (°) |
|----------------|----------------|----------------|------------------|------|----------------|--------|--------------------|-------------|
| Z/A-As | (100) | 31.835 | 31.772 | 1755 | 58 | 2.8088 | 2.8143 | 0.289 |
| | (002) | 34.438 | 37.422 | 2631 | 45 | 2.6021 | 2.6033 | 0.209 |
| | (101) | 36.312 | 36.253 | 2006 | 101 | 2.4720 | 2.4759 | 0.305 |
| Z/A-400 | (100) | 31.835 | 31.772 | 2384 | 58 | 2.8088 | 2.8143 | 0.284 |
| | (002) | 34.517 | 37.422 | 3539 | 45 | 2.5964 | 2.6033 | 0.239 |
| | (101) | 36.351 | 36.253 | 2936 | 101 | 2.4695 | 2.4759 | 0.307 |
| Z/A-500 | (100) | 31.914 | 31.772 | 2181 | 58 | 2.8020 | 2.8143 | 0.268 |
| | (002) | 34.596 | 37.422 | 3307 | 45 | 2.5906 | 2.6033 | 0.223 |
| | (101) | 36.371 | 36.253 | 2627 | 101 | 2.4682 | 2.4759 | 0.264 |
| Z/A-600 | (100) | 31.775 | 31.772 | 2141 | 58 | 2.8139 | 2.8143 | 0.178 |
| | (002) | 34.418 | 37.422 | 2059 | 45 | 2.6036 | 2.6033 | 0.264 |
| | (101) | 36.253 | 36.253 | 2334 | 101 | 2.4759 | 2.4759 | 0.240 |

Dislocation density values are seen in Table 2 and Fig 2 together with variations in crystallite sizes. From these values and images, it can be seen that the as-deposited film has minimum dislocation value according to annealed ones. Also, the highest annealing temperature has led to higher dislocation density values and so deteriorated crystal structure. It is estimated that the dislocation density increases due to the increase in the grain boundary per unit area while the crystal sizes decrease. This situation indicates transformations from compressive to tensile movements in the structure.

Table 2. Calculated structural parameters of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

| Sample | P | D (nm) | δ (line/nm ²) | ρ (ohm-cm) |
|----------------|----------------|--------|----------------------------------|-----------------|
| Z/A-As | 0.82587 | 28.60 | 1.22E-03 | 6.78 E+01 |
| | 1.63204 | 39.82 | 6.31E-04 | |
| | 0.54209 | 27.43 | 1.33E-03 | |
| Z/A-400 | 0.81877 | 29.11 | 1.18E-03 | 7.59 E+01 |
| | 1.60218 | 34.83 | 8.24E-04 | |
| | 0.57905 | 27.25 | 1.35E-03 | |
| Z/A-500 | 0.81291 | 30.85 | 1.05E-03 | 5.3 E+01 |
| | 1.62479 | 37.33 | 7.17E-04 | |
| | 0.56229 | 31.69 | 9.96E-04 | |
| Z/A-600 | 1.03673 | 46.43 | 4.64E-04 | 3.29 E+01 |
| | 1.31426 | 31.52 | 1.01E-03 | |
| | 0.64902 | 34.85 | 8.23E-04 | |

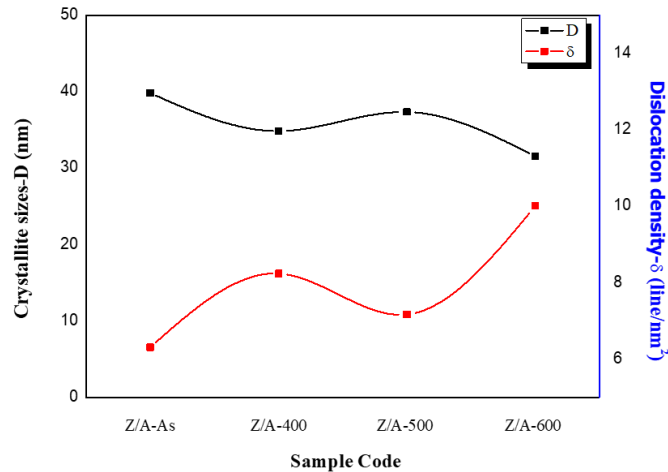


Figure 2. Variations of crystallite sizes and dislocation density values belonging to the (002) diffraction plane

Plan-view surface morphologies of Z/A-As, Z/A-400, Z/A-500, and Z/A-600 films have been investigated at X2500 and X5000 magnifications that are given in Fig 3 (a-h). Micrographs taken at X2500 magnification (Fig. 3 a-d) of all films exhibited agglomerations, cavities, root-like formations, and cracks (indicated with red lines in Fig. 3 a), f), e), and d), respectively) especially film annealed at 600°C. Micrographs that have been taken at X5000 (Fig. 3 e-h) show the details of the film surface and these formations. For example, cavities can be associated with droplet trails coming from spraying. However, root-like formations are associated with the temperature difference between the layers of film, evaporation of solvent during the production process, and losing the hydroxyl/alkoxy groups as a result of the heating process of this method in the literature and also been detailed in our earlier study [19, 36-39]. Cracks, as seen in the film annealed at 600°C, indicate structural deformations under the effect of higher annealing temperatures. To investigate these cracks, detailed images in different locations of the film have been taken. Results present the increasing crack formations (Fig. 3 d inset) in some regions accompanied by (Fig. 3 h inset) shrinkage. This situation may be correlated with the high thermal annealing temperatures and the loss of chemicals in the structure.

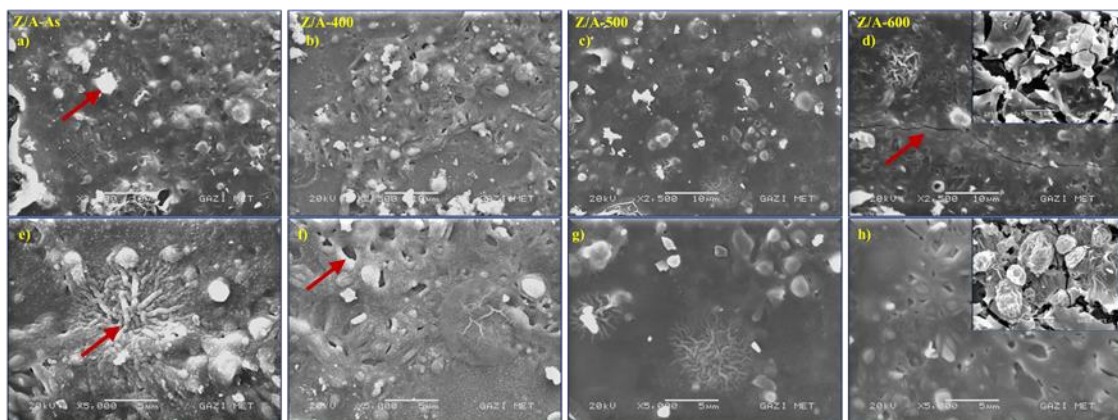


Figure 3. Plan-view SEM images of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

Cross-sectional SEM images of Z/A-As, Z/A-400, Z/A-500, and Z/A-600 films have been analyzed to determine the approximate film thicknesses and are given in Fig. 4 (a-d). From these figures, the average approximate thicknesses of all films have been determined as 1.25 μm; 776 nm; 1.49 μm; and 1.56 μm, respectively for Z/A-As, Z/A-400, Z/A-500, and Z/A-600 films. The decreasing thickness values for film annealed at 400°C may be associated with surface morphology, decreased roughness, and perhaps manufacturing conditions. Other studies on this subject have revealed the smooth, and homogeneous nanoscale film surface morphology, and thickness obtained from SEM and TEM images [14, 40-42].

However, it should be taken into account that the studies on ZnO/Al₂O₃ films have been exhibited by expensive vacuum production systems using gas-phase precursors, unlike spray pyrolysis.

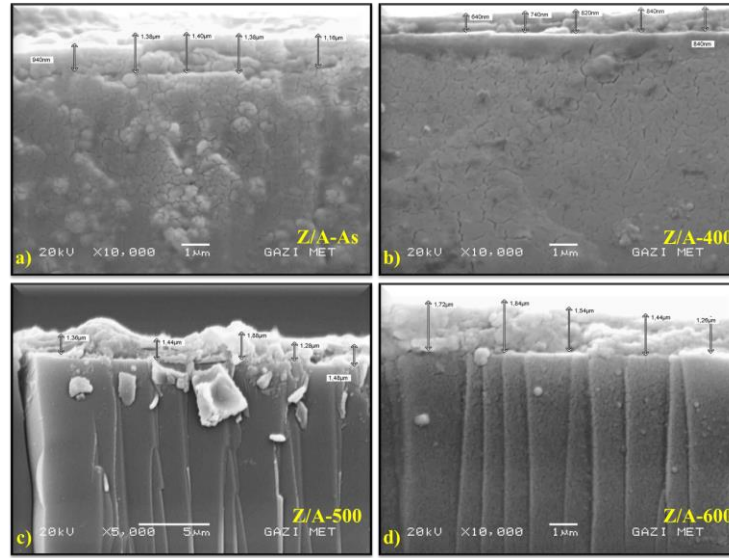


Figure 4. Cross-sectional SEM images of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

EDX analyses have been implemented on ZnO/Al₂O₃ films to understand the elemental behavior of layers after annealing. In figure 5, elemental investigations related to the Zn, Al, and O elements have been attempted to be determined from layers of ZnO/Al₂O₃ film numbered as 1, 2, and 3 points. It should be noted here that the layers have been selected and produced as Al₂O₃ on the bottom layer and ZnO on the upper layer during the spraying. Accordingly, 3 different points have been tried to be investigated for EDX analyses so as to be two layers and one junction region of films.

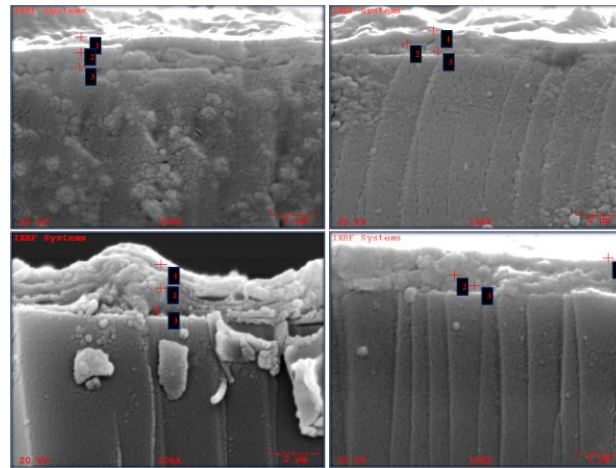


Figure 5. EDX analysis regions of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

Atomic weights (at %) of Zn, Al, and O elements from these points are listed in Table 3. From these selected points in the figures and analyzed results given in Table 3, it can be said that the 1st points present the decreasing zinc (Zn) concentrations under the effect of increasing annealing temperature. However, aluminum (Al) concentrations at these points are increasing with the increasing temperature. In the 2nd points, which we call the junction region, it can be seen that the Al concentrations are higher than in the first point which indicates the ZnO layer and increasing these values with annealing temperature as determined in the first points. Unlike the first points, a higher amount of Al concentration has been determined in these points, which can be attributed to the closeness of the junction region to the bottom aluminum layer. Considering the 3rd points, small concentrations of zinc have been determined. This can be attributed to the thickness/closeness of the layers and/or low precision of EDX measurement.

Consequently, it can be interpreted that all data indicates a higher amount of Al diffusions from the bottom layer to the top ZnO layer as a result of increasing annealing temperature.

Table 3. EDX measurement results of as-dep. and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films.

| Materials | As-dep. | | | 400°C | | | 500°C | | | 600°C | | |
|------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Zn | Al | O | Zn | Al | O | Zn | Al | O | Zn | Al | O |
| 1st Points | 66.02 | 10.46 | 23.52 | 47.36 | 25.37 | 27.27 | 59.25 | 29.82 | 10.92 | 22.07 | 64.69 | 13.25 |
| 2nd Points | 47.54 | 38.56 | 13.91 | 42.87 | 46.04 | 11.10 | 24.66 | 52.98 | 22.36 | 11.53 | 68.91 | 19.56 |
| 3rd Points | 21.72 | 53.05 | 25.23 | 20.30 | 52.23 | 27.47 | 15.01 | 72.45 | 12.55 | 8.41 | 72.78 | 18.82 |

Electrical resistivity measurement results of ultrasonic spray pyrolyzed ZnO/Al₂O₃ films have been listed in Table 2. These results indicate that the annealing of ZnO/Al₂O₃ films has caused a decrease in the resistivity values of the films from 6.78×10^1 ohm-cm to 3.29×10^1 ohm-cm. In general, resistivity of the films is increased with decreasing crystallite sizes in the film due to the increasing grain boundary [43, 44]. In the current study, the resistivities of our films have almost the same values. Alterations in the coefficients could be associated with the structural changes as phase transformations from (002) to (101) diffraction planes, thicknesses of the films, surface morphology as porosity and/or roughness, defects in the film structure like Zn interstitials and O vacancies.

Figure 6 presents the absorption spectra (a) and optical band gap of as-deposited and annealed ZnO/Al₂O₃ films. Almost the same and constant absorbance values have been determined for all bilayer ZnO/Al₂O₃ films throughout the 400-800 nm wavelength as seen in Figure 6 a). When it comes to short wavelengths an abrupt increase in the absorbance values indicates the fundamental absorption edges have been obtained between the 375-400 nm wavelengths. These absorption edges also indicate the optical band gaps of these films. However, in all films, only the annealed at 600°C film has revealed a distinctive absorbance behavior that shifts to the higher wavelength which presents the red shift of the absorption edge. This shift of the absorption edge indicates the lower energy level for optical band gap values of the ZnO/Al₂O₃ films annealed at 600°C. Optical band gap values of the ZnO/Al₂O₃ films have been calculated by the optical method as a result of absorbance spectra. From Figure 6 b), it can be seen that the films have 3.25 eV, 3.19 eV, 3.21 eV, and 3.17 eV optical band gap energies for as-deposited, annealed at 400 °C, 500 °C, 600 °C, respectively. Determined optical band gap values present the decreasing energies for the films after the annealing according to as-deposited film and bulk ZnO which is important for optoelectronic applications. Also, obtained band gap results in the current study present decreasing values compared to the study performed by Tuzemen et. al. who found approximately 3.28eV band gaps for nano-thick films [14].

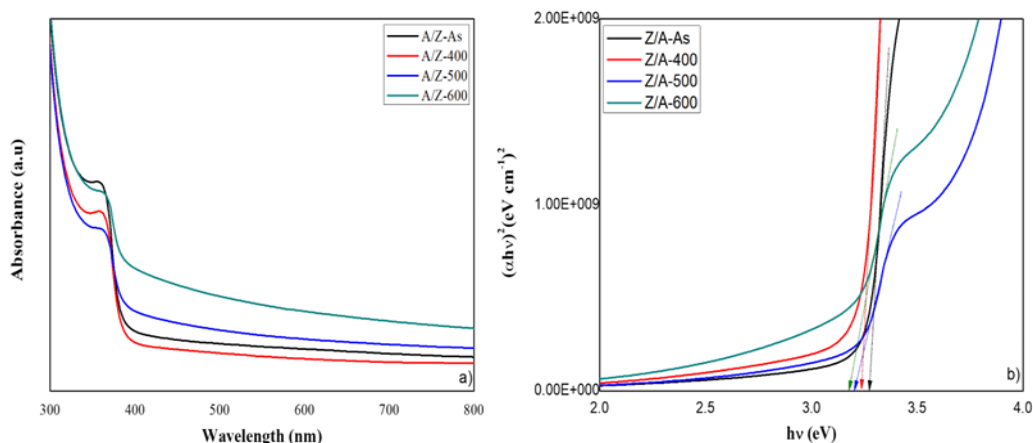


Figure 6. Absorbance spectra and bandgap from the plot of $(ahv)^2$ as a function of photon energy ($h\nu$) of as-deposited and annealed bilayer ZnO/Al₂O₃ films

4.CONCLUSION

In this study, the attitude of ZnO/Al₂O₃ bilayer film produced by ultrasonic spray pyrolysis on microscope slides under thermal annealing has been investigated. Therefore, precursor solutions including aluminum and zinc have been sprayed on substrates, respectively. In this process, the second layer has been produced by waiting for it to cool after the first layer is produced. After the production, ZnO/Al₂O₃ film was subjected to thermal annealing under atmospheric conditions at 400 °C, 500 °C, 600 °C, respectively. XRD analyses have presented the improved crystallinity until the annealing temperature reaches 600 °C. After that, Z/A-600 film exhibited a decline in the crystal structure, with changing preferred orientation to dominant growth directions according to Z/A-As, Z/A-400, and Z/A-500 films. So, crystallite sizes and dislocation densities which are indicators of crystal quality and/or defects present the alterations at this annealing temperature as a result of phase transformation between (002) and (101) diffraction planes. Plan-view SEM images exhibit agglomerations, cavitated areas, root-like formations, and cracks on the surfaces especially film annealed at 600°C related to the higher temperature. EDX analyses revealed the elemental diffusion from the Al₂O₃ layer to the ZnO layer as the annealing temperature increased. Also, cross-sectional SEM images have shown the average thicknesses of all films between 776nm to 1.56 μm. Resistivity values of the films from 6.78x10¹ ohm-cm to 3.29 x10¹ ohm-cm. Calculated optical band gap values of annealed bilayer films have shown that the decreasing values according to as-deposited ZnO/Al₂O₃ bilayer film is an expected situation for optoelectronic applications.

ACKNOWLEDGMENTS

No acknowledgment was declared by the author.

REFERENCES

- [1] Rowlette, P. C., Wolden, C. A., Pulsed plasma-enhanced chemical vapor deposition of Al₂O₃-TiO₂ nanolaminates, *Thin Solid Films*, 518(3337-3341), (2010).
- [2] Khan, M. I., Imran, S., Saleem, M., Rehman, S. U., Annealing effect on the structural, morphological and electrical properties of TiO₂/ZnO bilayer thin films. *Results in physics*, 8(249-252), (2018).
- [3] Besleaga, C., Stan, G. E., Galca, A. C., Ion, L., Antohe, S., Double layer structure of ZnO thin films deposited by RF-magnetron sputtering on glass substrate. *Applied surface science*, 258(8819-8824) (2012).

- [4] Yadav, H. M., and Kim, J. S., Fabrication of SiO₂/TiO₂ double layer thin films with self-cleaning and photocatalytic properties. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 27(10082-10088) (2016).
- [5] Lin, C. Y., Chen, J. G., Feng, W. Y., Lin, C. W., Huang, J. W., Tunney, J. J., Ho, K. C., Using a TiO₂/ZnO double-layer film for improving the sensing performance of ZnO based NO gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 157(361-367) (2011).
- [6] Ding, K., Zhang, X., Ning, L., Shao, Z., Xiao, P., Ho-Baillie, A., ... and Jie, J., Hue tunable, high color saturation and high-efficiency graphene/silicon heterojunction solar cells with MgF₂/ZnS double anti-reflection layer. *Nano Energy*, 46(257-265), (2018).
- [7] Kanda, H., Uzum, A., Harano, N., Yoshinaga, S., Ishikawa, Y., Uraoka, Y., ... and Ito, S., Al₂O₃/TiO₂ double layer anti-reflection coating film for crystalline silicon solar cells formed by spray pyrolysis. *Energy Science & Engineering*, 4(269-276), (2016).
- [8] Mahadik, M. A., Shinde, S. S., Mohite, V. S., Kumbhar, S. S., Moholkar, A. V., Rajpure, K. Y., ... and Bhosale, C. H., Visible light catalysis of rhodamine B using nanostructured Fe₂O₃, TiO₂ and TiO₂/Fe₂O₃ thin films. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 133(90-98), (2014).
- [9] Polyakov, B., Kuzmin, A., Vlassov, S., Butanovs, E., Zideluns, J., Butikova, J., ... and Zubkins, M., A comparative study of heterostructured CuO/CuWO₄ nanowires and thin films. *Journal of Crystal Growth*, 480 (78-84), (2017).
- [10] Viter, R., Iatsunskyi, I., Fedorenko, V., Tumenas, S., Balevicius, Z., Ramanavicius, A., ... and Bechelany, M., Enhancement of electronic and optical properties of ZnO/Al₂O₃ nanolaminate coated electrospun nanofibers. *The Journal of Physical Chemistry C*, 120(5124-5132), (2016).
- [11] Elam, J. W., Sechrist, Z. A., George, S. M., ZnO/Al₂O₃ nanolaminates fabricated by atomic layer deposition: growth and surface roughness measurements, *Thin Solid Films*, 414(43-55), (2002).
- [12] Martínez-Castelo, J. R., López, J., Domínguez, D., Murillo, E., Machorro, R., Borbón-Nuñez, H. A., ... and Tiznado, H., Structural and electrical characterization of multilayer Al₂O₃/ZnO nanolaminates grown by atomic layer deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 71 (290-295), (2017).
- [13] Ahn, C. H., Kim, S. H., Kim, Y. K., Lee, H. S., and Cho, H. K., Effect of post-annealing temperatures on thin-film transistors with ZnO/Al₂O₃ superlattice channels. *Thin Solid Films*, 584 (336-340) (2015).
- [14] Tüzemen, E. Ş., Özer, A., Demir, İ., Altuntaş, İ., Şimşir, M., ZnO/Al₂O₃ layered structures deposited by RF magnetron sputtering on glass: growth characteristics, optical properties, and microstructural analysis. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 57(1379-1388) (2021).
- [15] Zahid, M. A., Khokhar, M. Q., Park, S., Hussain, S. Q., Kim, Y., and Yi, J., Influence of Al₂O₃/IZO double-layer antireflective coating on the front side of rear emitter silicon heterojunction solar cell. *Vacuum*, 200(110967), (2022).
- [16] Purica, M., Budianu, E., Rusu, E., Danila, M. A., and Gavrilă, R., Optical and structural investigation of ZnO thin films prepared by chemical vapor deposition (CVD). *Thin Solid Films*, 403(485-488), (2002).
- [17] Di Mauro, A., Fragala, M. E., Privitera, V., and Impellizzeri, G., ZnO for application in photocatalysis: From thin films to nanostructures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 69(44-51), (2017).
- [18] Kaneva, N. V., Dushkin, C. D., Preparation of nanocrystalline thin films of ZnO by sol-gel dip coating. *Bulg Chem Commun*, 43(259-263), (2011).

- [19] Polat Gönüllü, M. The Effect of Annealing Technique on ZnO Film Properties. *Gazi University Journal of Science*, 35(618-629), (2022).
- [20] Pradhan, S. K., Reucroft, P. J., Ko, Y., Crystallinity of Al₂O₃ films deposited by metalorganic chemical vapor deposition. *Surface and Coatings Technology*, 176(382-384), (2004).
- [21] Nalcaci, B., Polat Gonullu, M., Insight of mechanical and morphological properties of ALD-Al₂O₃ films in point of structural properties. *Applied Physics A*, 127(1-10) (2021).
- [22] Ateş, H., Polat Gonullu, M., Atomik Katman Biriktirme Tekniğine Genel Bakış: ZnO, TiO₂ ve Al₂O₃ Filmlerin Üretimi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 7/3 (649-660) (2019).
- [23] Khazamipour, N., Kabiri-Ameri-Aboutorabi, S., Asl-Solaimani, E., The structural, electrical and optical properties of ZnO/Al₂O₃ multilayer deposited on PET substrates by RF sputtering. *Renewable energy*, 49(275-277), (2013).
- [24] Cui, G., Han, D., Dong, J., Cong, Y., Zhang, X., Li, H., ... and Wang, Y., Effects of channel structure consisting of ZnO/Al₂O₃ multilayers on thin-film transistors fabricated by atomic layer deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S), (2017) 04CG03.
- [25] Chaaya, A. A., Viter, R., Baleviciute, I., Bechelany, M., Ramanavicius, A., Gertnere, Z., ... and Miele, P., Tuning optical properties of Al₂O₃/ZnO nanolaminates synthesized by atomic layer deposition. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(3811-3819), (2014).
- [26] Gonullu, M. P., Design and characterization of single bilayer ZnO/Al₂O₃ film by ultrasonically spray pyrolysis and its application in photocatalysis. *Superlattices and Microstructures*, 164(107113), (2022).
- [27] Patil, P. S., Versatility of chemical spray pyrolysis technique. *Materials Chemistry and physics*, 59(185-198), (1999).
- [28] Gonullu, M. P., Kose, S., On the Role of High Amounts of Mn Element in CdS Structure. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(1321-1329), (2017).
- [29] Khan, M. I., Ali, A., Effect of laser irradiation on the structural, morphological and electrical properties of polycrystalline TiO₂ thin films. *Results in physics*, 7(3455-3458), (2017).
- [30] Garnier, J., Bouteville, A., Hamilton, J., Pemble, M. E., Povey, I. M., A comparison of different spray chemical vapour deposition methods for the production of undoped ZnO thin films. *Thin Solid Films*, 518(1129-1135), (2009).
- [31] Bacaksiz, E., Parlak, M., Tomakin, M., Özçelik, A., Karakiz, M., Altunbaş, M., The effects of zinc nitrate, zinc acetate and zinc chloride precursors on investigation of structural and optical properties of ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 466(447-450), (2008).
- [32] Jakschik, S., Schroeder, U., Hecht, T., Gutsche, M., Seidl, H., and Bartha, J. W., Crystallization behavior of thin ALD-Al₂O₃ films. *Thin Solid Films*, 425(216-220), (2003).
- [33] Barrett, C. S., CS, B., and TB, M., *Structure of metals, Crystallographic methods, principles and data*, (1980).
- [34] Callister, W. D., and Rethwisch, D. G., *Materials science and engineering: an introduction (Vol. 9)*. (2018), New York: Wiley.
- [35] Mamazza Jr, R., Morel, D. L., and Ferekides, C. S., Transparent conducting oxide thin films of Cd₂SnO₄ prepared by RF magnetron co-sputtering of the constituent binary oxides. *Thin solid films*, 484(26-33), (2005).

- [36] Sutanto, H., Durri, S., Wibowo, S., Hadiyanto, H., Hidayanto, E., Rootlike morphology of ZnO:Al thin film deposited on amorphous glass substrate by sol-gel method. *Physics Research International*, 2016: 1-7, (2016).
- [37] Navin, K. and Kurchania, R., Structural, Morphological and Optical Studies of Ripple Structured ZnO Thin Films. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 121: 1155- 1161, (2015).
- [38] Kwon, S. J. Park, J. H., Park, J. G., Wrinkling of sol-gel-derived thin Film. *Physical Review E* 71: 011604, (2005).
- [39] Scherer, G. W., Sintering of sol-gel films. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 8(1): 353-363, (1997).
- [40] Khazamipour, N., Kabiri-Ameri-Aboutorabi, S., Asl-Solaimani, E., The structural, electrical and optical properties of ZnO/Al₂O₃ multilayer deposited on PET substrates by RF sputtering. *Renewable energy*, 49, 275-27, (2013).
- [41] Ahn, C. H., Kim, S. H., Kim, Y. K., Lee, H. S., Cho, H. K., Effect of post-annealing temperatures on thin-film transistors with ZnO/Al₂O₃ superlattice channels. *Thin Solid Films*, 584, 336-340, (2015).
- [42] Choi, D. W., Kim, S. J., Lee, J. H., Chung, K. B., Park, J. S., A study of thin film encapsulation on polymer substrate using low temperature hybrid ZnO/Al₂O₃ layers atomic layer deposition. *Current Applied Physics*, 12, S19-S23, (2012).
- [43] Huafu, Z., Hanfa, L., Aiping, Z., Changkun, Y., Influence of the distance between target and substrate on the properties of transparent conducting Al-Zr co-doped zinc oxide thin films. *Journal of semiconductors*, 30(11), 113002, (2009).
- [44] Lu, J. G., Ye, Z. Z., Zeng, Y. J., Zhu, L. P., Wang, L., Yuan, J., Liang, Q. L., Structural, optical, and electrical properties of (Zn, Al) O films over a wide range of compositions. *Journal of Applied Physics*, 100(7), 073714, (2006).



Theoretical Derivation of Effective Channel Capacity Expression for Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channels

Mehmet BİLİM¹ Yasin KABALCI^{2,*}

¹Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38170, Kocasinan/KAYSERİ

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 51240, Merkez/NİĞDE

Graphical/Tabular Abstract

In this study, the effective channel capacity analysis of a single input single output system over Beaulieu-Xie shadowed is presented.

Article Info:

Research article
Received: 3.08.2022
Revision: 27.08.2022
Accepted: 29.08.2022

Highlights

- Beaulieu-Xie.
- Shadowed.
- Effective channel capacity.

Keywords

Communication system
SISO
Effective channel capacity
Beaulieu-Xie. Shadowed fading channel.

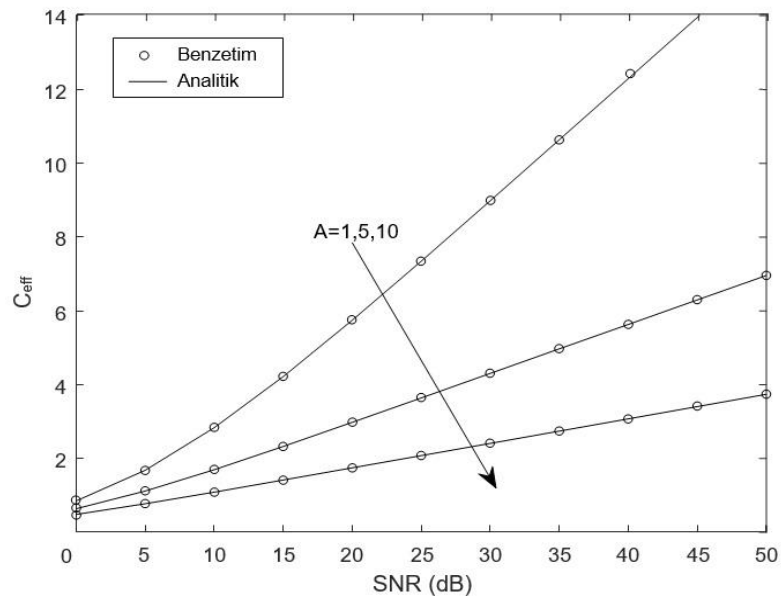


Figure A. Effective channel capacity comparison of the considered system for different A values.

Purpose: One of the main purposes of this study is to propose the effective channel capacity expression in a different channel fading called the Beaulieu-Xie shadowed and to show the channel capacity performance of traditional communication systems with this derived expression.

Theory and Methods: The closed-form effective channel capacity expression is derived by employing the probability density function of the the Beaulieu-Xie shadowed. For the derivations, some summation expansions and Meijer's G function transformations are used.

Results: By using the derived effective channel capacity expression, the effective channel capacity performance evaluations are presented for different fading parameter values, average signal-to-noise ratio values, A values and shading parameter values. In all results, it is aimed to show the correctness of the proposed expression by giving the theoretical results and exact numerical simulation results.

Conclusion: In this study, for the first time in the literature, the expression of effective channel capacity of a single input single output wireless communication system is derived. By providing mathematical operations in these derivations, the accuracy of the derivations is shown in comparison with the exact simulations. Various results are given with different parameter values in the considered system.



Theoretical Derivation of Effective Channel Capacity Expression for Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channels

Mehmet BİLİM¹ Yasin KABALCI^{2,*}

¹Nuh Naci Yazgan University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 38170, Kocasinan/KAYSERİ

²Niğde Ömer Halisdemir University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 51240, Merkez/NİĞDE

Abstract

This study presents the effective channel capacity (C_{eff}) analysis for a communication system in which the line between transmitter and receiver has a single path including Beaulieu-Xie shaded (BX-shadowed, BX-S) fading. In the study, the C_{eff} expression is theoretically derived, and the probability density function (PDF) of BX-S fading is used for the derivations. The accuracy of the C_{eff} expression is tried to be demonstrated with computer simulations, and various scenarios are examined with different parameter changes.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 3.08.2022
Düzeltilme: 27.08.2022
Kabul: 29.08.2022

Keywords

Communication System
Effective Channel
Capacity
Beaulieu-Xie Shadowed
Fading Channel

Anahtar Kelimeler

Haberleşme Sistemi
Etkelif Kanal Kapasitesi
Beaulieu-Xie Gölgelemeli
Sönümlü Kanal

Beaulieu-Xie Gölgelemeli Sönümlü Kanallar İçin Etkelif Kanal Kapasite İfadesinin Kuramsal Türetimi

Öz

Bu çalışma, alıcı-verici arasındaki hattın tek ve Beaulieu-Xie gölgelemeli (BX-shadowed, BX-S) sönümlenmeye sahip olduğu bir sistem için etkelif kanal kapasitesi (effective channel capacity, C_{eff}) analizini sunmaktadır. Çalışmada C_{eff} ifadesi kuramsal olarak türetilmekte, türetimler için BX-S sönümlenmesine ait olasılık yoğunluk fonksiyonundan (probability density function, PDF) yararlanılmaktadır. C_{eff} ifadesinin doğruluğu bilgisayar benzetimleri ile gösterilmeye çalışılmakta, farklı parametre değişimleri ile çeşitli senaryolar incelenmektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beşinci nesil (Fifth Generation, 5G) ve devamında gelecek olan yeni nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin düşük hata olasılık oranı, yüksek kapasite, yüksek kararlılık ve düşük gecikme gibi önemli sistem karakteristiklerine sahip olması hedeflenmektedir. Gelişen her yeni neslin bu karakteristik özellikleri karşılayabilir olması ve bir önceki nesle göre önemli iyileştirmeler sağlaması beklenmektedir. Bu kapsamda geliştirilecek olan her aday sistemin, öncelikle teorik analizlerinin gerçekleştirilmesi, başarımının farklı senaryolarda değerlendirilmesi ve ardından doğrulanan sistemin pratik uygulamasının gerçek hayata aktarılması sağlanmaktadır [1-3].

Herhangi bir haberleşme sistemine ait matematiksel ifade, çok yollu sönümlenme ve gölgeleme etkilerini de içeren kablosuz yayılım kanal modeline doğrudan ve tamamen bağlıdır. 5G ve ötesi gibi modern haberleşme sistemleri değerlendirildiğinde, iletişim ağına bağlanan gezgin kullanıcı ve cihazların artan miktarı kapsama alanının daralmasına, işaret gürültü oranının (signal-to-noise ratio, SNR) ve işaret gücünün girişim/gürültü gücüne oranının (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, mevcut klasik kablosuz kanal sönümlenme modelleri (örneğin Rayleigh, Rician, Nakagami- m , Hoyt, vb.) gerçek hayattaki kanal ölçümlerine tam olarak uymamaktadır. Bu probleme çözüm olarak Beaulieu-Xie (BX) kanal modeli literatüre kazandırılmıştır [4]. Bu kanal modelinin klasik sönümlü

kanal modellerine göre üstünlüğü, direkt görüş hattı (line of sight, LoS) ve direkt görüş hattı olmayan (non-line of sight, NLoS) durumları kapsayan geliştirilmiş bir kanal modeli olmasıdır. Ayrıca, bu kanal modelinin matematiksel ifadesinde uygun parametre seçimi yapılarak, Rayleigh, Ricean, geliştirilmiş Ricean, κ - μ ve Nakagami- m gibi klasik sönümlü kanal modellerine ait eşitlikler de elde edilebilmektedir. BX kanal modeli, geliştirilmiş bir kanal modeli olması nedeniyle son dönemde yoğun ilgi görmeye başlamıştır [5–15].

[6] numaralı çalışmada, kaskatlanmış çift BX sönümleme modeli için matematiksel bir karakterizasyon sunulmuş, olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) ve kümülatif dağılım fonksiyonu (cumulative distribution function, CDF) ifadeleri türetilmiştir. Bir diğer çalışmada araştırmacılar, çöz-ve-aktar (decode-and-forward) tekniği kullanan radyo frekans (RF) ve serbest uzay optik (free-space optical, FSO) temelli çift atlamalı bir haberleşme sisteminin performansını BX kanalında analiz etmişlerdir [7]. BX sönümlü kanal modelinin, seviye geçiş oranı (level crossing rate, LCR) ortalama sönüm süresi (average fade duration, AFD) Olutayo ve arkadaşları tarafından analiz edilmiştir [8]. BX sönümleme kanalı için eşit kazanç birleştirme (equal gain combining, EGC), seçim birleştirme (selection combining, SC) ve maksimum oranlı birleştirme (maximal ratio combining, MRC) tekniklerinin farklı sınır analizleri Olutayo ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır [9]. Artan ilgi ile birlikte BX kanal modeline sönümlenme özelliğine ilave olarak gölgeleme etkisi de eklenerek Beaulieu-Xie gölgelemeli (BX-shadowed, BX-S) kanal modeli önerilmiştir [10]. [11]'de sunulan çalışmada gölgeleme etkisi olmadan Beaulieu-Xie sönümlü kanal için bir kapasite hesabı ortaya konulmuştur. Öte yandan Beaulieu-Xie rastgele değişkeninin sırasıyla η - μ , κ - μ , ve α - μ rastgele değişkenleri ile çarpımlarından oluşan yeni rastgele değişkenlerin servis-dışı kalma olasılığı analizi [12]'de sunulmuştur. [13]'teki yazarlar, iki Beaulieu-Xie değişkenli durumun ortak faz ve dağılımlarının analizini gerçekleştirmişlerdir. Akıllı yansıtıcı yüzeylerin BX-S kanalları için fiziksel katman güvenliğine olan etkisi [14]'teki çalışmada verilmiştir. Gerçekleştirilen literatür taramasında BX-S kanallar için efektif kanal kapasite (effective channel capacity, C_{eff}) analizinin, yazarların bildiği kadarıyla, şimdiye kadar gerçekleştirilmemiş olduğu görülmüştür. Bu motivasyon ışığında, bu çalışmada BX-S kanalları için C_{eff} analizi detaylı bir şekilde incelenmektedir. Böylelikle literatürdeki bu boşluk bu çalışma ile giderilmeye çalışılmaktadır. Bu kapsamda öncelikli olarak BX-S kanalları için C_{eff} eşitliği analitik yöntemler ile türetilmekte, ardından bilgisayar benzetimleri aracılığıyla kapsamlı analizler gerçekleştirilmektedir.

2. SİSTEM VE KANAL MODELLERİ (SYSTEM AND CHANNEL MODELS)

Tek girişli tek çıkışlı (single input single output, SISO), verici ile alıcı arasındaki sönümlenmenin Beaulieu-Xie gölgelemeli olduğu bir iletişim sistemi ele alınmaktadır. Bu çalışmada, ele alınan sisteme ait C_{eff} analizi gerçekleştirilmektedir. Kanal kapasitesinin analizi için alıcıdaki anlık SNR'sinin PDF ifadesinden faydalanılmaktadır. Buna göre ele alınan sistem için alıcıdaki anlık SNR'in PDF ifadesi [10]'daki çalışmadan yararlanarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$f_{\gamma}(\gamma) = \Xi \gamma^{m_x-1} {}_1F_1\left(m_y; m_x; \varpi \gamma\right) e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} \quad (1)$$

burada $\Xi = \frac{1}{\Gamma(m_x)} \left(\frac{m_y \Omega_x}{m_x \Omega_y + m_y \Omega_x} \right)^{m_y} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{m_x}$, m_x ve Ω_x sırasıyla sönümlenme parametresi ve NLoS

bileşenin gücüdür. m_y gölgeleme parametresini, Ω_y ise LoS bileşenin gücünü ifade etmektedir. $\Gamma(\cdot)$ Gama fonksiyonunu ve ${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$ ise Hipergeometrik fonksiyonu temsil etmektedir [11]. Eşitlik (1)'deki ϖ

ise $\varpi = \frac{(m_x)^2 \Omega_y}{\Omega_x (m_x \Omega_y + m_y \Omega_x)}$ olarak tanımlanmaktadır.

[15]'deki ${}_1F_1(a; b; cx) = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(a)_s c^s x^s}{(b)_s s!}$ seri açılımı kullanıldığında, Eşitlik (1)'deki PDF ifadesi,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} \quad (2)$$

olarak yeniden düzenlenmektedir. Analizlerde matematiksel olarak kullanım kolaylığı olduğu için Eşitlik (2)'deki PDF ifadesi kullanılmaktadır.

3. EFEKTİF KANAL KAPASİTESİ ANALİZİ (EFFECTIVE CHANNEL CAPACITY ANALYSIS)

Bir iletişim sisteminin C_{eff} ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanır [16]:

$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(E \left[(1+\gamma)^{-A} \right] \right) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (3)$$

burada, $E[\cdot]$ beklenen değer, $A = \delta \varphi B / \ln 2$, δ doluluk azalma oranını, φ blok uzunluğunu ve B ise bant genişliğini belirtmektedir. Eşitlik (1)'de verilen PDF ifadesi kullanılarak C_{eff} ifadesi,

$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \times I \right) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (4)$$

şeklinde elde edilir. Burada I ifadesi,

$$I = \int_0^{\infty} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} (1+\gamma)^{-A} d\gamma \quad (5)$$

şeklindedir. I integralini çözmek için,

$$(1+\gamma)^{-A} = \frac{1}{\Gamma(A)} G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (6)$$

olarak verilen dönüşüm kullanılırsa,

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)} \int_0^{\infty} \gamma^{m_x+s-1} e^{-\frac{m_x}{\Omega_x} \gamma} G_{1,1}^{1,1} \left(\gamma \left| \begin{matrix} 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) d\gamma \quad (7)$$

şeklinde bir integral elde edilir. Bu integralde integrant sabitine bağlı bir polinom, bir üstel ve bir Meijer's G fonksiyonu bulunmaktadır. Bu formata sahip olan I integralini çözmek için [15, Eşitlik (7.813.1)] kullanılarak

$$I = \frac{1}{\Gamma(A)} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-(m_x+s)} G_{2,1}^{1,2} \left(\left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-1} \left| \begin{matrix} 1-(m_x+s), 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (8)$$

şeklinde çözüm elde edilir. Eşitlik (8) ile elde edilen I çözümü, Eşitlik (4)'te yerine yazılarak

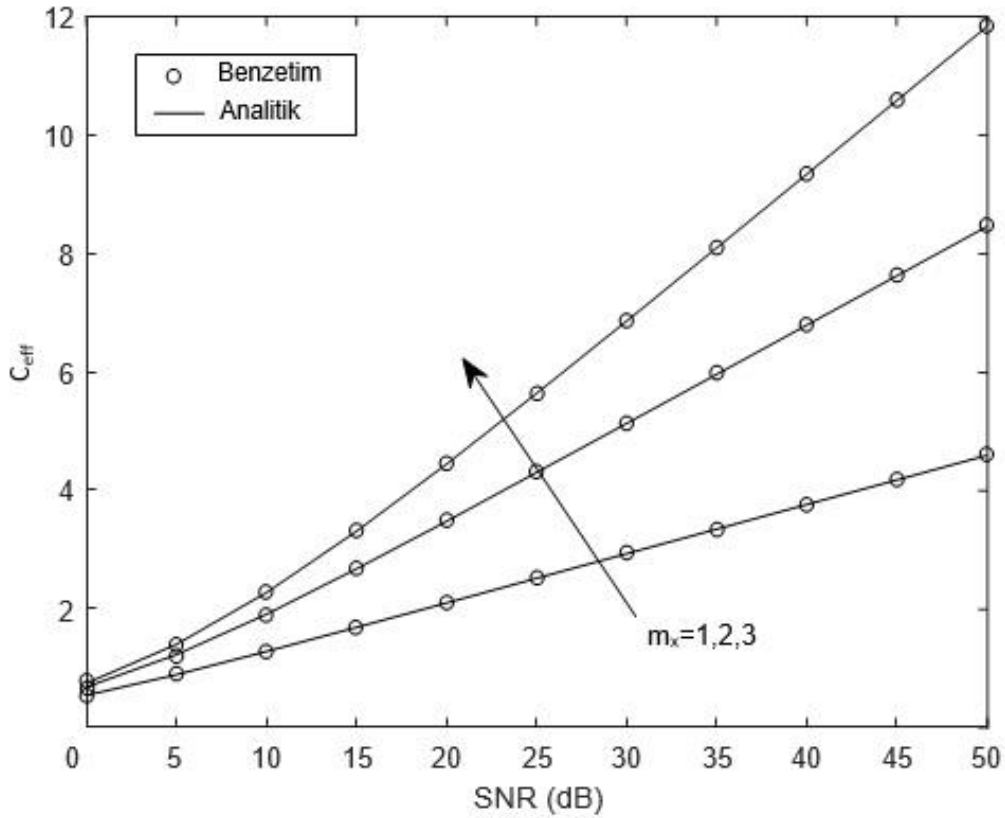
$$C_{eff} = -\frac{1}{A} \log_2 \left(\Xi \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(m_y)_s \varpi^s}{(m_x)_s s!} \frac{1}{\Gamma(A)} \left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-(m_x+s)} G_{2,1}^{1,2} \left(\left(\frac{m_x}{\Omega_x} \right)^{-1} \left| \begin{matrix} 1-(m_x+s), 1-A \\ 0 \end{matrix} \right. \right) \right) \quad (9)$$

ifadesi türetilir. **Yazarların bildiği kadarıyla, Eşitlik (9)'da verilen ifade literatürde ilk kez bu çalışmada sunulmaktadır.**

4. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, ele alınan sistemin C_{eff} 'ine ait elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bir önceki bölümde türetilen Eşitlik (9)'daki ifade ile analitik sonuçlar elde edilirken, Eşitlik (4)'teki tam ifadenin nümerik olarak değerlendirilmesi ile bilgisayar benzetim sonuçları elde edilmiştir. Bütün sonuçlarda, Eşitlik (9)'daki sonsuz terimli seri toplamında 20 terim kullanılmıştır. Bu çalışmadaki bütün sonuçlarda Mathematica ve Matlab yazılım programları kullanılmıştır. Bütün sonuç grafiklerinde analitik sonuçlar çizgilerle gösterilirken, tam benzetim sonuçları da simgelerle gösterilmektedir. Sonuçların hepsinde analitik sonuçlar ile tam benzetim sonuçlarının iyi bir uyum içerisinde olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum, yapılan kuramsal analiz doğru olduğunu açıkça göstermektedir.

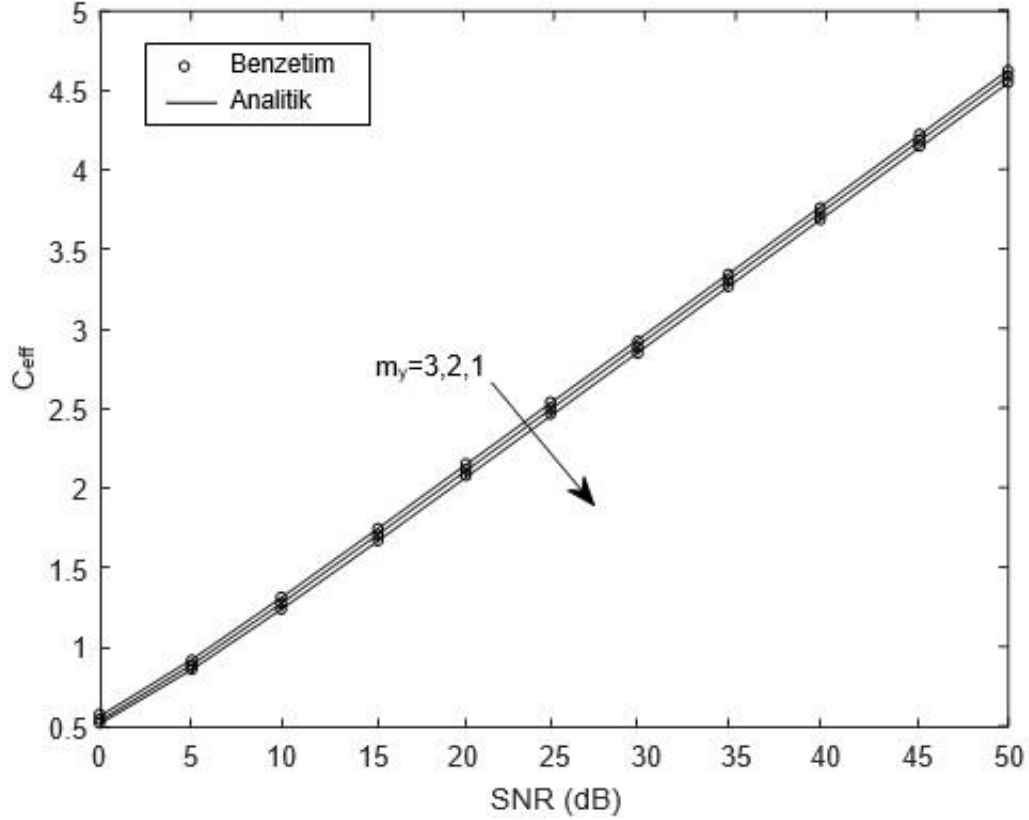
Şekil 1'de ele alınan sistem için m_x sönümlenme parametresinin değişiminin C_{eff} performansı üzerine olan etkileri gösterilmektedir. Şekil 1 için $m_y = 2$, $A = 4$ ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşit olarak alınmıştır.



Şekil 1. m_x sönümlenme parametresi değişimine ele alınan sistemin C_{eff} performans eğrileri

Ayrıca, buradaki sonuçlarda m_x değeri sırasıyla 1, 2, ve 3 olarak alınmıştır. m_x parametre değerinin artmasıyla BX-S kanalların sönümlenme etkisinin iyileşmesi göz önüne alındığında, sistemin C_{eff} performansı iyileşmektedir. Bu durum literatürdeki çalışma örneklerinde de görülmektedir. Şekil 1'deki senaryoya benzer şekilde, BX-S kanalların m_y parametre değişiminin C_{eff} performansına olan etkisi Şekil 2'de incelenmektedir. Burada, $m_x = 1$, $A = 4$ ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşittir. Şekil 2'den de görüldüğü gibi, m_y parametre değişiminin sistemin C_{eff} performansına olan etkisinin m_x parametre değişimine oranla daha az olduğu görülmektedir. Şekil 2'deki sonuçlarda, m_y parametre

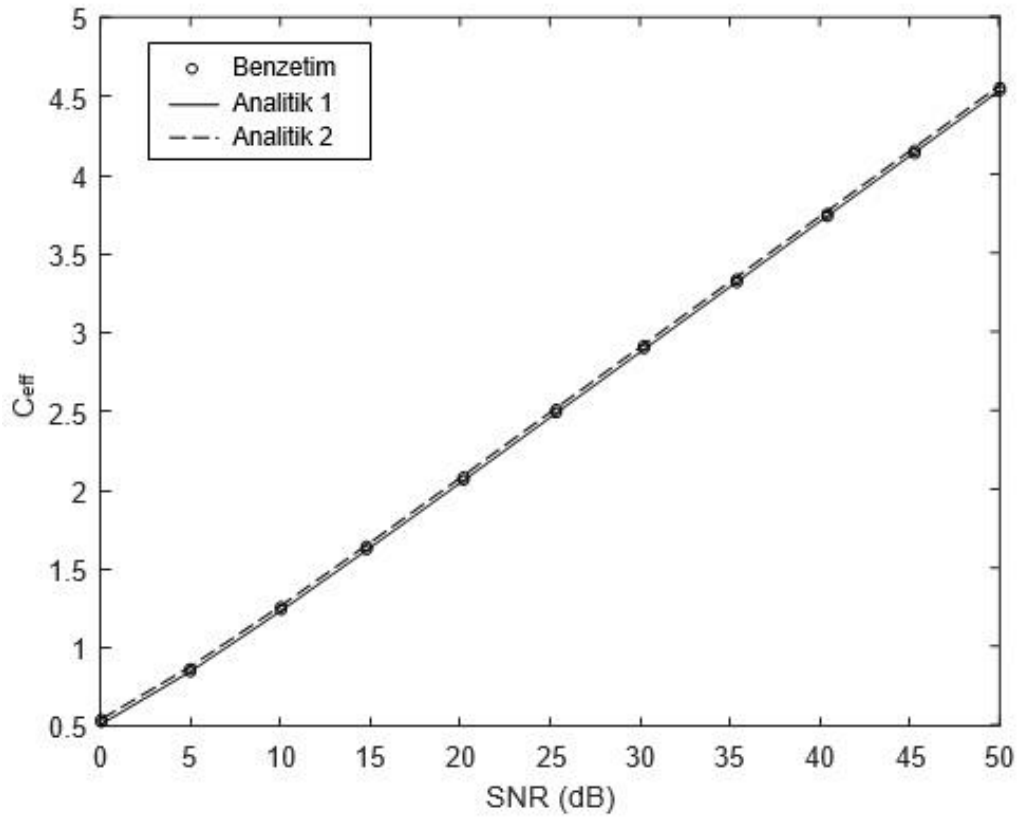
değeri 1, 2, ve 3 olarak ele alınmış, ancak her üç durumda da C_{eff} performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu dikkati çekmektedir. Buradan hareketle, m_x parametresinin sistemin C_{eff} performansına olan etkisinin m_y parametresinin sistemin C_{eff} performansına olan etkisine göre daha fazla olduğu net bir şekilde ortadadır.



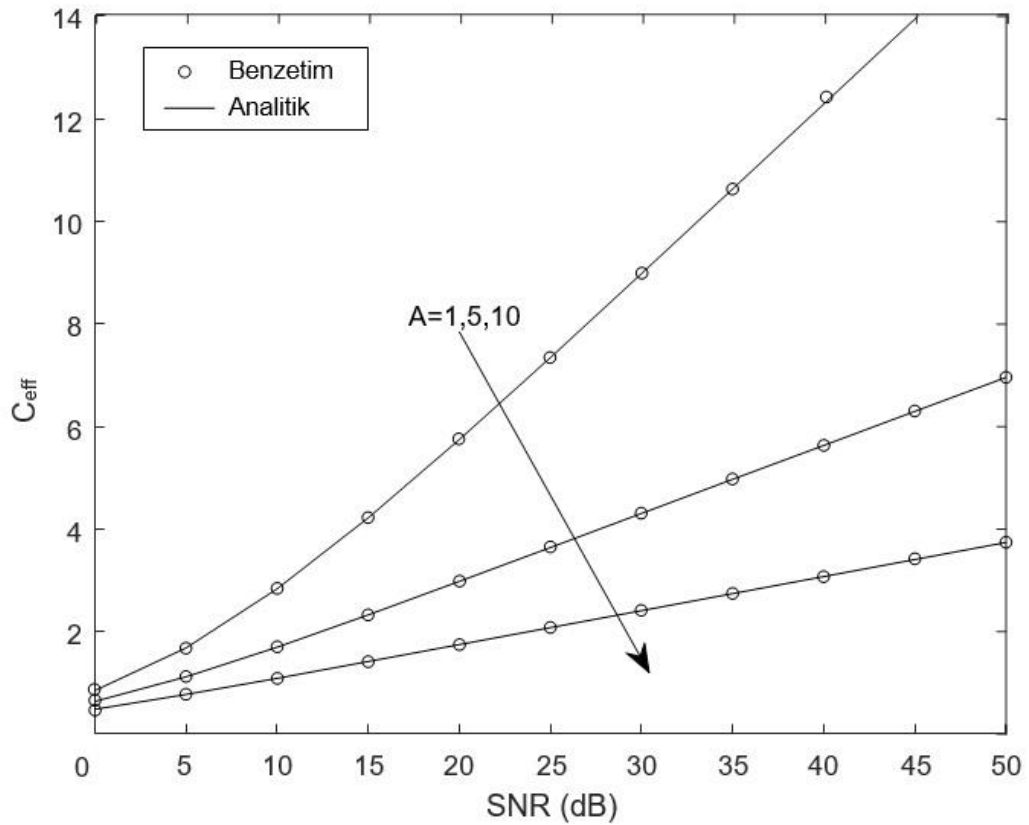
Şekil 2. Farklı m_y gölgeleme parametresi ile ele alınan sistemin C_{eff} kıyaslaması

Şekil 3'te sunulan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması için $m_x = 1$, $m_y = 2$, ve $A = 4$ olup, farklı Ω_x ve Ω_y değerleri incelenmektedir. Birinci durumda (şekil üzerinde Analitik 1 olarak isimlendirilen durum) $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşit (diğer sonuçlarda olduğu gibi) alınmış, ikinci durumda ise (şekil üzerinde Analitik 2 olarak isimlendirilen durum) Ω_x toplam ortalama SNR miktarının dörtte bir miktarına eşit iken, Ω_y toplam ortalama SNR miktarının dörtte birinin üç katına eşit olarak alınmıştır. Analitik 1 ve Analitik 2 olarak adlandırılmış bu iki durumda C_{eff} performansları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Bunun da sebebi BX-S kanalların Ω_x ve Ω_y ifadelerini ortak bir biçimde kullanan matematiksel bir modele sahip olması olarak yorumlanabilir.

Sunulan son sonuç grafiği Şekil 4'te, farklı A değerlerinin C_{eff} performans kıyaslamaları sunulmaktadır. Buradaki sonuçlar için $m_x = 2$, $m_y = 2$, ve $\Omega_x = \Omega_y$ olup toplam ortalama SNR miktarının yarısına eşittir. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, A değeri arttıkça, literatürdeki diğer çalışmalardaki gibi, sistemin C_{eff} performansı azalmaktadır.



Şekil 3. Farklı Ω_x ve Ω_y değerleri ile ele alınan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması



Şekil 3. Farklı A değerleri durumları ile ele alınan sistemin C_{eff} performans kıyaslaması

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

BX-S sönümlü kanallardaki SISO bir sistemin C_{eff} ifadesi kuramsal olarak literatürde ilk kez bu çalışmada türetilmiş ve ele alınan sistemin C_{eff} performansı detaylı bir şekilde incelenmiştir. Sunulan C_{eff} ifadesinin doğruluğu tam nümerik benzetim çalışmaları ile gösterilmeye çalışılmıştır. BX-S kanal modeline ait parametrelerin değişimleri ile farklı senaryolar oluşturulmuş, buna göre C_{eff} performansının değişimleri sunulmuştur. İki kollu iletim, röleli aktif iletim veya çok girişli çok çıkışlı sistem modelleri gibi farklı sistem yapılarının BX-S kanallarındaki kapasite analizlerinin yapılması bu çalışmanın devamı olabilecek çalışmalar olarak belirtilebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Y. Kabalci, 5G mobile communication systems: Fundamentals, challenges, and key technologies, in *Smart Grids and Their Communication Systems*, Springer, (2019), 329–359.
- [2] S. Ramavath, A. V. Jha, U. Chandra, B. Appasani, Y. Kabalci, and E. Kabalci, PAPR reduction of filter bank techniques for 5G communication systems,” in *5G and Beyond Wireless Systems*, Springer, (2021), 171–189.
- [3] Y. Kabalci, 5G iletişim sistemleri için aday iletim tekniklerinin bit hata oranı başarımlarının araştırılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendis. Bilim. Derg.*, 9: 2, (2020), 821–831.
- [4] N. C. Beaulieu and X. Jiandong, A novel fading model for channels with multiple dominant specular components,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 4: 1, (2014), 54–57.
- [5] M. Bilim, A comprehensive analytical perspective of ASEP for Beaulieu-Xie fading channels, *Int. J. Commun. Syst.*, p. e5244, doi: <https://doi.org/10.1002/dac.5244>.
- [6] H. S. Silva, D. B. Almeida, W. J. Queiroz, I. E. Fonseca, A. S. Oliveira, and F. Madeiro, Cascaded double Beaulieu-Xie fading channels, *IEEE Commun. Lett.*, 24: 10, (2020), 2133–2136.
- [7] J. Hu, Z. Zhang, J. Dang, L. Wu, and G. Zhu, Performance of decode-and-forward Relaying in mixed Beaulieu-Xie and M dual-hop transmission systems with digital coherent detection, *IEEE Access*, 7, (2019), 138757–138770.
- [8] A. Olutayo, H. Ma, J. Cheng, and J. F. Holzman, Level crossing rate and average fade duration for the Beaulieu-Xie fading model, *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, 6: 3, (2017), 326–329.
- [9] A. Olutayo, J. Cheng, and J. F. Holzman, Performance bounds for diversity receptions over a new fading model with arbitrary branch correlation, *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, 2020: 1, (2020), 1–26.
- [10] A. Olutayo, J. Cheng, and J. F. Holzman, A new statistical channel model for emerging wireless communication systems, *IEEE Open J. Commun. Soc.*, 1, (2020), 916–926.
- [11] V. Kansal and S. Singh, Analysis of effective capacity over Beaulieu-Xie fading model, IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), 2017, pp. 207-210, doi: 10.1109/WIECON-ECE.2017.8468917.
- [12] H. S. Silva, D. B. T. Almeida, W. J. L. Queiroz, I. E. Fonseca, A. S. R. Oliveira and F. Madeiro, Outage Probability of the Product of Two Beaulieu-Xie, η - μ , κ - μ , or α - μ Random Variables, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19: 12, (2020), 2182-2186.

- [13] H. S. Silva, D. B. T. Almeida, W. J. L. Queiroz, H. T. P. Silva, A. S. R. Oliveira and F. Madeiro, Beaulieu-Xie Phase-Envelope Joint and Bivariate Distributions, *IEEE Commun. Lett.*, 25: 5, (2021), 1453-1457.
- [14] A. S. Gvozdarev, T. K. Artemova, D. M. Murin and P. E. Patralov, Reconfigurable Intelligent Surfaces' Impact on the Physical Layer Security of the Beaulieu-Xie Shadowed Fading Channel, International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISNCC55209.2022.9851721.
- [15] I. Gradshtein and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*. Academic press, 2000.
- [16] M. Bilim, Effective throughput of alternate rician shadowed fading links, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, 15: 6, (2020) 928–930.

Effect of Particle Velocity and Impingement Angle on Inner Surface Erosive Wear Behavior of Basalt/Epoxy Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Technique

Seyit Mehmet DEMET^{1,*}  Harun SEPETÇİOĞLU²  Mehmet BAĞCI¹ 

¹Konya Technical University, Faculty of Engineering and Natural Science, Department of Mechanical Engineering, 42250, Selçuklu/KONYA

²Selçuk University, Faculty of Technology, Department of Metallurgy and Materials Engineering, 42075, Selçuklu/KONYA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 7.09.2022
Revision: 19.10.2022
Accepted: 31.10.2022

Highlights

- Solid particle erosion of composite pipe
- Filament winding basalt fiber reinforced composite pipe
- Erosion efficiency

Keywords

Erosive wear
BFR/EP
Erosion resistance
ASTM G76-96
Composite pipe

In this study, erosion wear behavior of basalt fiber reinforced composite pipe in the variability of impingement angle and impact velocity was investigated. Considering the erosion efficiency, it has been determined that the wear model is composed in the form of semi-ductile material behavior.

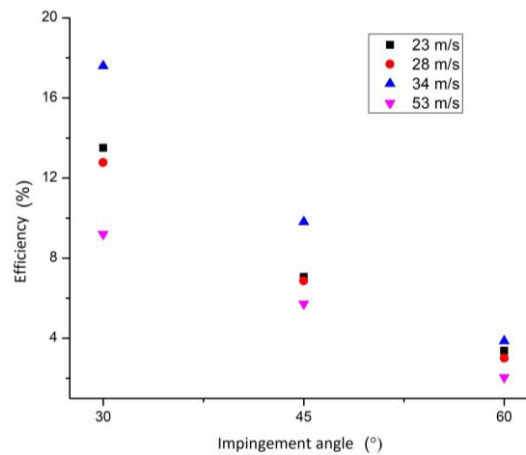


Figure A. Effect of impact velocity on erosion efficiency of BFR/EP composite pipes.

Purpose: In this study, it was aimed to examine the effect of impingement angle and impact velocity on erosion wear on the inner surface of the composite pipe.

Theory and Methods: An experimental study was carried out in the erosion wear test set, which is designed and manufactured in accordance with the ASTM G76-95 standard. Alumina was used as the abrasive particle in the tests. Abrasive particles were impacted on the test sample at four different impact velocities and three different impingement angles. As a result of the experimental study, the erosion rates were determined and the damaged areas on the inner surface of the pipe were examined.

Results: The erosion resistance of the composite pipes produced on the CNC filament winding machine has been examined for the first time in the literature. Particle impact velocity and impingement angle play an effective role in erosive wear. The highest erosion rate values were achieved at an impingement angle of 45° and an impact speed of 53 m/s.

Conclusion: As a result of the experimental study in which the axial particle flow in the pipe was simulated, it was observed that the increase in velocity decreased the erosion resistance and caused an increment in the erosive wear loss. It has been determined that the wear behavior on the inner surface of the composite pipe is compatible with the erosion wear model that occurs in semi-ductile materials.



Effect of Particle Velocity and Impingement Angle on Inner Surface Erosive Wear Behavior of Basalt/Epoxy Composite Pipes Manufactured by Filament Winding Technique

Seyit Mehmet DEMET^{1,*} Harun SEPETÇİOĞLU² Mehmet BAĞCI¹

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 42250, Selçuklu/KONYA

²Selçuk Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 42075, Selçuklu/KONYA

Abstract

Composite materials find in many application areas, especially as an alternative to metal-based materials. In this experimental study, the use of Basalt Fiber Reinforced Epoxy (BFR/EP) composite pipes in the defense industry, maritime, infrastructure, and transmission facilities have been considered. For this purpose, Basalt Fiber Reinforcement (BFR), which also shows high chemical and thermal balance, high strength, temperature/electricity, and sound insulation properties, was preferred, and composite pipes were produced in $[\pm 55]_4$ winding configuration on CNC filament winding machines with the addition of Epoxy (EP) matrix. Based on applications where as fluidized bed in the pipe, it is aimed to impinge the abrasive particles with different impact velocities by different impact angles in the direction of the flow in the pipe. To investigate the solid particle erosive wear behavior of the inner surface of the composite pipe $\sim 600 \mu\text{m}$ abrasive particles with angular geometry used, which has impact velocities are 23/ 28/ 34/53 m/s, these velocities were also determined by using the double disc method. The impingement angles were determined as $30^\circ/45^\circ/60^\circ$ at the test set complying with ASTM G76-95 standard. Experiments were repeated three times and the results were interpreted. It was concluded that the increase in the impact velocity of the particles decreases the erosion resistance on the inner surface of the pipe. It has been determined that the wear behavior on the inner surface of the composite pipe is compatible with the erosion wear model that occurs in semi-ductile materials.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 7.09.2022
Düzeltilme: 19.10.2022
Kabul: 31.10.2022

Keywords

Erosive wear
BFR/EP
Erosion resistance
ASTM G76-96
Composite pipe

Anahtar Kelimeler

Erozif aşınma
BET/EP
Erozyon direnci
ASTM G76-96
Kompozit boru

Filament Sarım Bazalt / Epoksi Kompozit Boruların İç Yüzey Erozyon Direnci ve Çarpma Açısının Etkisi

Öz

Kompozit malzemeler birçok alanda özellikle metal esaslı malzemelere alternatif olarak uygulama alanı bulmaktadır. Bu deneysel çalışmada Bazalt Elyaf Takviyeli Epoksi (BET/EP) kompozit boruların savunma sanayi, denizcilik, alt yapı ve aktarım tesislerinde kullanımı dikkate alınmıştır. Bu amaçla yüksek kimyevi ve ısı denge, iyi mukavemet, sıcaklık/elektrik ve ses yalıtım özellikleri de gösteren Bazalt Elyaf Takviyesi (BET) tercih edilmiş olup Epoksi (EP) matris ilavesiyle CNC filament sarım makinelerinde $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda kompozit borular üretilmiştir. Boru içerisinde partiküllü akışın olduğu uygulamaların temelinde farklı hızlara sahip aşındırıcıların boru içerisindeki akış yönü doğrultusunda farklı açılarda çarpması amaçlanmıştır. Boru içi katı partikül erozyonunu araştırmak için, ASTM G76-95 standardıyla uyumlu deney setinde çift disk metodu kullanılarak belirlenen 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarındaki açısal geometriye sahip $\sim 600 \mu\text{m}$ aşındırıcı partiküller, 30° , 45° ve 60° olmak üzere üç farklı çarpma açısında BET/EP kompozit boruların iç yüzeyine etki edecek şekilde tekrarlı deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar yorumlanmıştır. Partiküllerin çarpma hızındaki artışın boru iç yüzeyinde erozyon direncini azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Kompozit boru iç yüzeyindeki aşınma davranışının yarı sünek malzemelerde oluşan erozyon aşınması modeli ile uyum sağladığı belirlenmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elyaf takviyeli kompozitler metalik malzemelere göre daha hafif, kullanılan elyaf özelliklerine göre farklı mukavemet özelliklerine sahip, farklı kullanım alanlarında daha uzun ömürlü bir performans sergilemektedir [1, 2]. Kompozit malzemelerin öne çıkan performans özellikleri sayesinde yakın dönem denizcilik, havacılık vb. sahalarda metal esaslı malzemelere göre tercih sebebi olmaktadır [3, 4]. Bu sektörlerle birlikte altyapı [5, 6] ve iletim tesislerinde kullanılan beton ve metal esaslı boruların iletim sürecinde aşınma, korozyona uğrama gibi sebeplerden dolayı bozulup hasara uğramaları bu alanlarda da kompozit malzeme kullanımını tercih sebebi yapma potansiyelindedir [7]. Kent içi su iletim ve dağıtım tesislerinde, kanalizasyon sistemlerinde, kimya sanayi için gerekli depolama ve malzeme aktarımı süreçlerinde kompozit malzemeden imal edilen borular için kullanım alanı bulunmaktadır [8-11].

Kompozit malzemelerde takviye malzemeler kompozitin özelliklerine etki etmekte ve kullanım alanına uygun özelliklere sahip bir yapı oluşturulmasına imkân vermektedir. Saha uygulamalarında yaygın olarak cam elyaf takviyeli, karbon elyaf takviyeli çalışmalar görülmektedir. Bunlarla birlikte farklı takviye malzemeleri kullanılarak üretilen kompozitler ile ilgili araştırma çalışmaları yapılmaktadır [12-14]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde kompozitlerin mukavemet özellikleri, işlenebilirliği, aşınma davranışları gibi birçok özelliklerinin araştırıldığı görülmektedir ve genellikle plaka şeklinde üretilen malzemeler kullanılmaktadır [15-21].

Bu çalışmada kompozit malzemelerin boru imalat uygulamalarında da kullanıldığı dikkate alınarak erozif ortamda bulunabilecek kompozit borunun tribolojik davranışı araştırılmıştır. Takviye elemanı olarak bazalt elyaf kullanılmıştır. Bazalt elyaf yüksek kimyevi ve ısıya dayanıklı, yüksek ısı ve elektrik yalıtımı gibi önemli özelliklere sahiptir. Bazalt elyaflar hava ve su ile reaksiyona girmemektedir ve -230°C ile $+700^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında kullanılabilir özelliğine sahiptir. Bu özelliklerinin yanı sıra yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve korozyon direncinin getirdiği tribolojik avantajları bulunmaktadır [22, 23]. Bu sebeplerden dolayı bazalt elyaf takviyeli epoksi boruların iletim hatlarında kullanılabileceği durum dikkate alınarak boru içi katı partikül akışı deneysel ortamda simüle edilerek boru iç yüzeyinde oluşabilecek aşınma hasarları araştırılmıştır.

Bu amaçla yapılan deneylerde dört farklı çarpma hızının sabit aşındırıcı partikül etkisi ve üç farklı çarpma açısındaki erozif aşınma durumu kompozit borunun iç yüzeyinde incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Deney Malzemesi (Test Material)

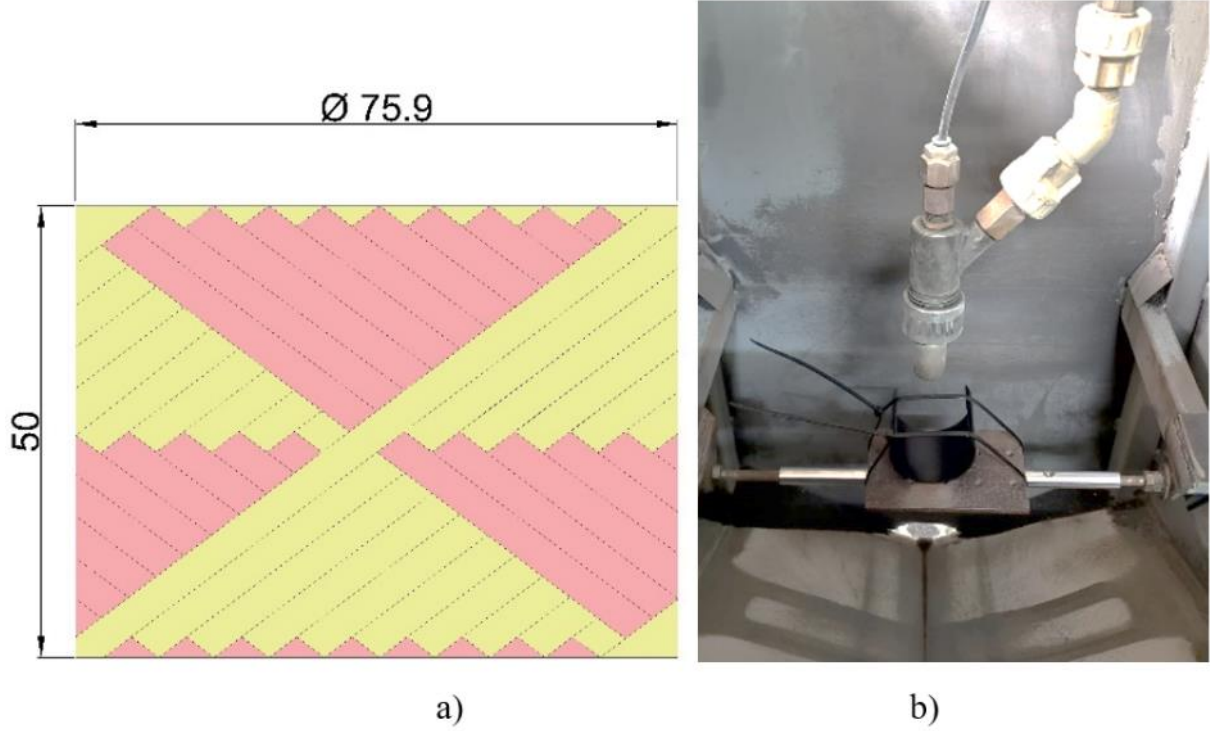
Üretilen kompozit borularda $13\ \mu\text{m}$ ve $1000\ \text{m}$ elyaf uzunluğu $400\ \text{gram}$ olan monofilament bazalt lifleri kullanılmıştır. Filament sarım yöntemi kullanılarak imal edilen kompozit borularda Bisphenol-A epoksi reçine (ticari adı EPIKOTE™ 828 LVEL) ve anhidrit bazlı kürleme ajanı (ticari adı EPIKURE™ 866) tercih edilmiştir. Kullanılan elyaf ve epoksi reçineye ait mekanik özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bazalt elyaf ve reçinenin özellikleri.

| | Elastisite ModülüE, GPa | Çekme Mukavemeti σ , MPa | Yoğunluğu ρ , g/cm ³ |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Bazalt Elyaf | 90-95 | 2900-3200 | 2.48 |
| Epoksi Reçine | 3.2 | 70-75 | 1.25 |

Filament sarım yöntemi kullanılarak bazalt elyaflar $10\ \text{N}$ elyaf gerilimi, ortalama $11\ \text{mm}$ bant genişliğinde ve $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonunda CNC filament sarım makinesinde üretilmiştir. Kompozit borular İzoreel kompozit yalıtım malzemeleri Ltd. (İzmir, Türkiye) şirketine ait tesiste üretilmiştir. Kompozit borular $1.85\ \text{mm}$ et kalınlığına ve $72.2\ \text{mm}$ dış çapa sahip $1\ \text{m}$ uzunluğundaki mandrel üzerine helisel olarak sarılmıştır. Filament sarım işlemi tamamlandıktan sonra kompozit borular yatay döner fırında önce

120°C’de 3 saat kürlenmiş ve nihai olarak 140°C’de 3 saat kürleme (post-cure) işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan borular 50 mm uzunluğunda kesilerek deney setine uygun ölçüye getirilmiştir (Şekil 1.a). Deney numunelerinin deney setine montajı Şekil 1.b’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneysel numune tasarımı; a) Boruların sarım konfigürasyonu (ölçüler mm’dir), b) Deney seti konumu.

Üretilen boruların mekanik özellikleri halka çekme ve sertlik ölçümü testleri ile belirlenmiş ve Tablo 2’de sunulmuştur.

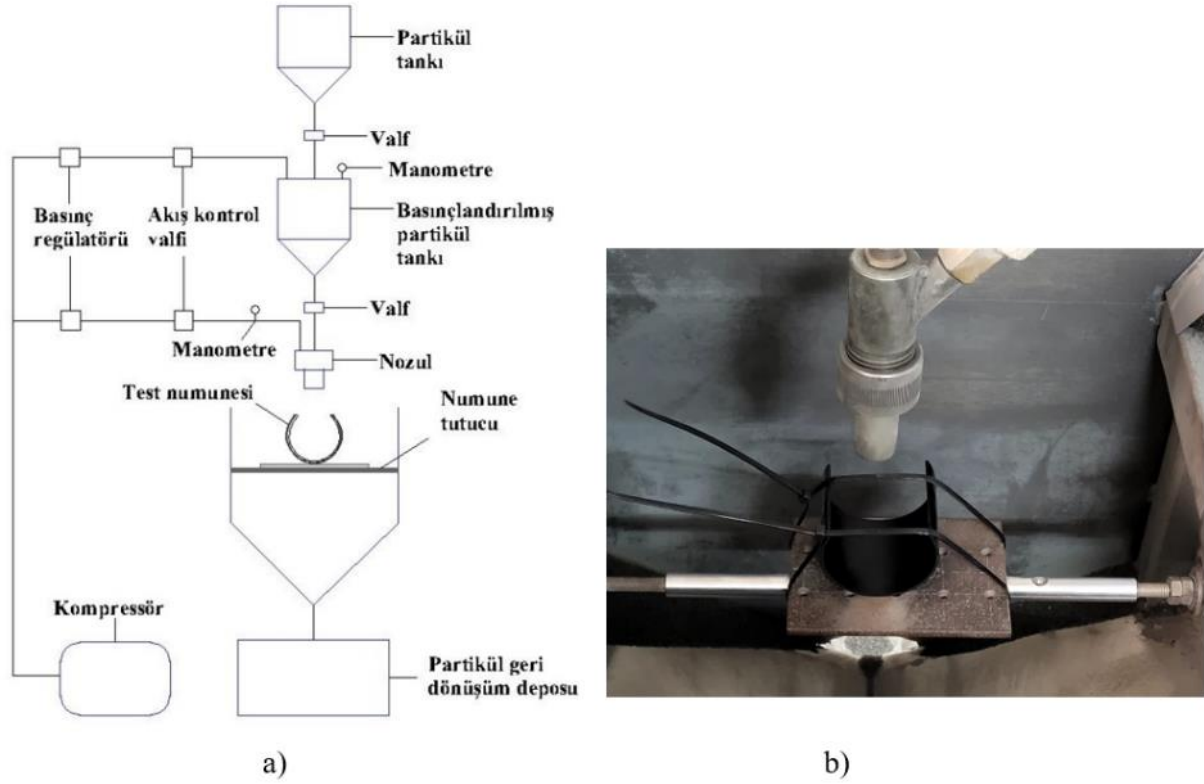
Tablo 2. BET/EP kompozit boruların mekanik özellikleri

| Halka Çekme Testi | | Sertlik Testi | |
|-------------------------------|------------|-----------------------|-----------|
| Standart | ASTM D2290 | Standart | ASTM D785 |
| Test hızı (mm/dk) | 5 | Skala | HRL |
| Çekme mukavemeti (MPa) | 689.3±46.9 | Sertlik değeri | 115.6±4.2 |

2.2. Deney Tesisatı (Test Setup)

Erozyon aşınması testlerinde katı partikül erozyon aşınması testi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da deneyler Şekil 2’de bileşenleri ile birlikte şematik resmi verilen ve ASTM G76-95 standardına uygun olarak tasarlanıp imal edilen erozyon aşınması deney setinde yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan aşındırıcı partiküller öncelikle “Partikül tankı”na eklenmiş olup ardından “Basınçlandırılmış partikül tankı”na sevk edilip test numunesi üzerine belirlenmiş olan hız ile çarptırılmaktadır. Deney seti üzerinde bulunan “Numune tutucu” elemanın açılabilir konumunda yapılan değişiklikler sayesinde de farklı açılarda test yapabilmek imkânı bulunmaktadır.



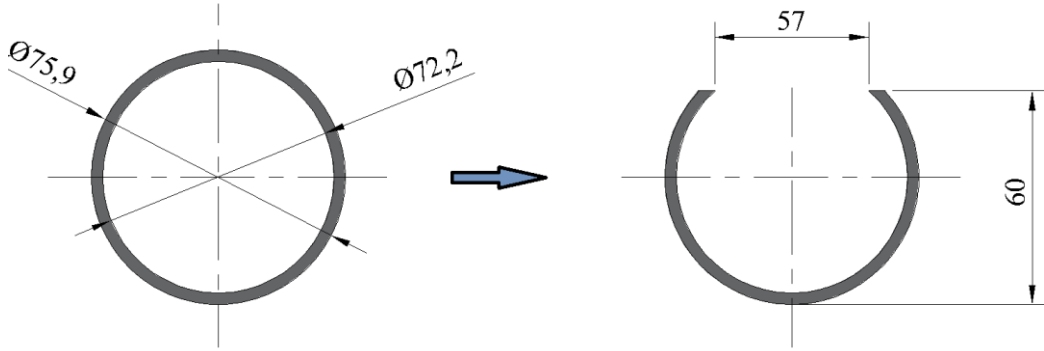
Şekil 2. Deney tesisi; a) Bileşenlerin detaylı şematik gösterimi, b) Kompozit borunun deney setindeki pozisyonu.

Kompozit boruların iç yüzeyindeki partikül akışına bağlı olarak eroziv aşınma etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşındırıcı partikülün farklı hız ve açılarda boru iç yüzeyinde oluşturduğu tribolojik etki incelenmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan parametrik veriler Tablo 3’de belirtilmiştir.

Tablo 3. Deney parametreleri.

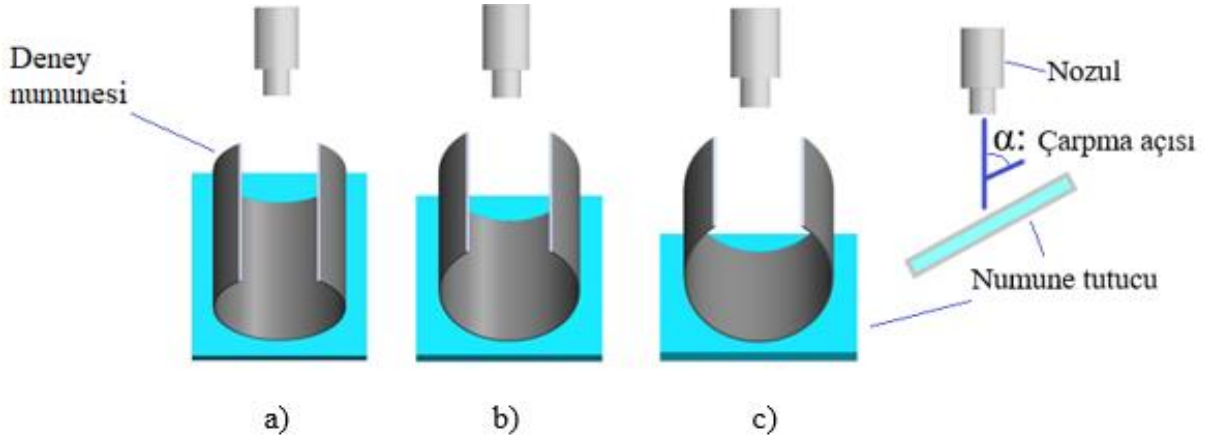
| Deney parametresi | Tanımlama |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Aşındırıcı | Alümina (Al_2O_3) |
| Aşındırıcı boyutu | 600 μm |
| Partikül çarpma açıları | $30^\circ/45^\circ/60^\circ$ |
| Partikül çarpma hızları | 23/28/34/53 m/s |
| Ortam sıcaklığı | 20–22 $^\circ C$ |
| Nozul-Deney numunesi arası mesafe | 10 mm |
| Nozul çapı | 6 mm |

Farklı açılarda etki ettirilen partiküllerin boru içi akışında sabit nozul mesafesini koruyabilmek için kompozit boru Şekil 3’ de gösterildiği gibi kesilip numune tutucu üzerine yerleştirilerek tüm deneyler aynı şartlar altında yapılmıştır.



Şekil 3. Kompozit borunun kesilme işlemi sonrası deney numunesi (ölçüler mm'dir).

Şekil 4'de şematik olarak gösterildiği gibi yaklaşık 600 µm ortalama boyutundaki alümina aşındırıcı partiküller 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarında ve 30°, 45° ve 60° çarpma açılarında boru içerisine etki ettirilmiştir. Deneylerde partikül hızlarının belirlenmesinde çift disk metodu kullanılarak deney setinde çarpma hızı ayarlaması basınç değişiminin hız etkisi paralelinde gerçekleştirilmiştir.



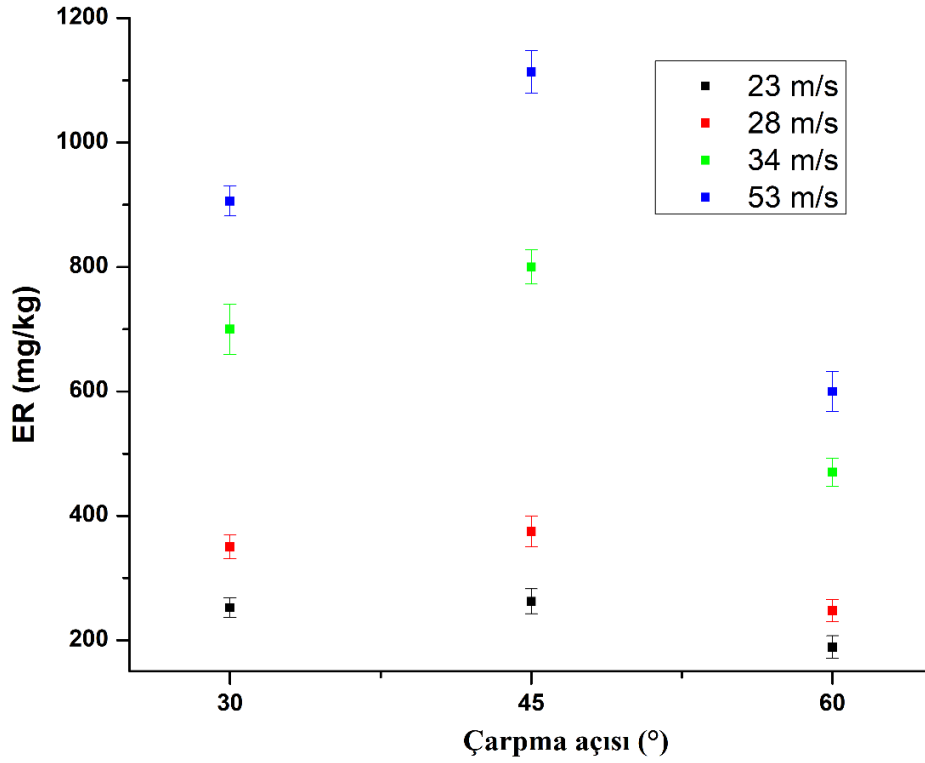
Şekil 4. Deney numunelerinin numune tutucudaki açısal konumları; a) 30°, b) 45°, c) 60°.

Deneyel çalışmalar sonucunda boru içi erozyon hasarını incelemek için Erozyon oranı (ER) dikkate alınmıştır. Deney numuneleri test öncesi ve test sonrası 10^{-4} gr hassasiyete sahip hassas terazide tartılarak boru da oluşan ağırlık kayıpları (ΔW , mg) belirlenmiş ve aşındırıcı miktarı (Q_p , kg) ile oranı dikkate alınarak yorumlanmıştır. Erozyon oranı aşağıdaki eşitlik (1) ile belirlenmiştir.

$$ER = \frac{\Delta W}{Q_p} \text{ (mg/kg)} \quad (1)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

BET/EP kompozit borudan hazırlanan deney numunelerinin erozyon testleri ortalama 600 µm çap değerindeki açısal geometrik forma sahip aşındırıcı partiküller ile farklı çarpma hızları ve çarpma açıları yapılmıştır. Partikül çarpma hızları 23, 28, 34 ve 53 m/s olarak belirlenmiştir. Çarpma açıları ise 30°, 45° ve 60° olacak şekilde belirlenmiş ve kompozit boru iç yüzeyi erozif aşınmaya tabi tutulmuştur. BET/EP kompozit boruların iç yüzeylerinde çarpma hızı ve çarpma açılarına bağlı olarak aksel doğrultuda elde edilen erozyon direncine ait karşılaştırmalı sonuçlara ulaşılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. BET/EP kompozit boruların hız etkisine bağlı açı-erozyon oranı değişimleri.

Şekil 5’deki grafik aşındırıcı partiküllerin çarpma açısındaki değişimine bağlı olarak çarpma hızının erozyon oranına etkisini doğrudan ortaya koymaktadır. Deney seti yetenekleri arasında tanımlanan ve çift disk metodu ile belirlenen çarpma hızlarının değişiminin etkisi deneylerde incelenmiştir. Grafiklerdeki her bir noktanın belirlenebilmesi için üç farklı deney yapılmış olup bu deneylerin değişken sonuçları hata çubukları ile grafikte sunulmaktadır.

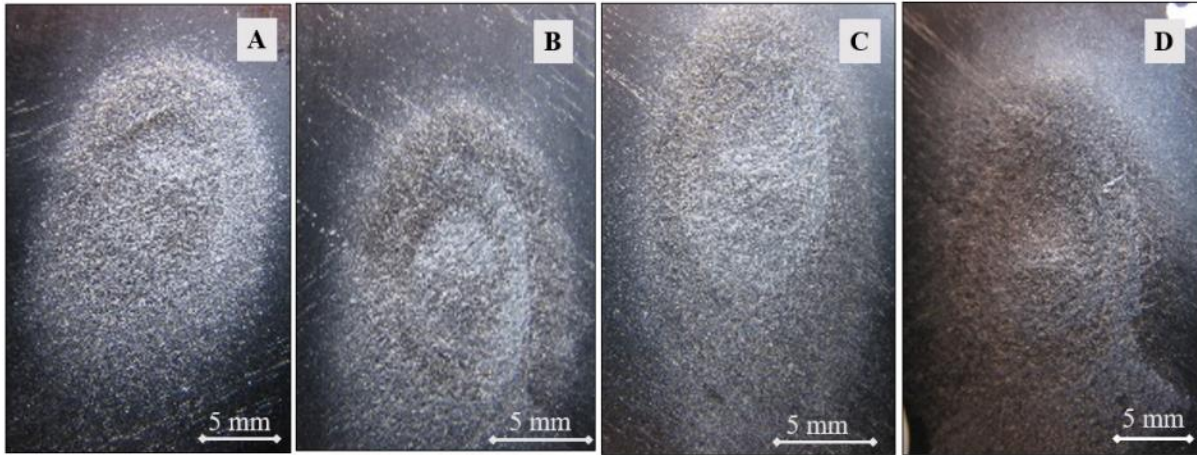
Erozif aşınma üzerine yapılan çalışmalarda deney numunelerinden elde edilen erozyon oranı çarpma açısı grafiklerinden deneylerde kullanılan malzemeler hakkında sünek, yarı sünek ve gevrek özellik sergilediği yorumu yapılmaktadır. Bu yoruma aşındırıcı partikül çarpma hızının ve açısının, aşındırıcı partikül boyutunun, sertliğinin, şeklinin, tipinin ve akış debisinin önemli etkisi bulunmaktadır [24-27].

Erozyon oranının maksimum seviyeye ulaşmasında malzeme özelliğini belirleyen 15°–30°, 45°–60° ve 90° çarpma açıları elde edilen en üst değerler sırasıyla çarpma açısına bağlı olarak sünek, yarı sünek ve gevrek özellikte malzeme tanımını oluşturmaktadır. Bu deneysel çalışmada ise bazalt elyaf etkisi yarı sünek malzeme davranışı etkinliğine katkı sağlamıştır [28-30]. Sonuç olarak bazalt elyafın özellikle endüstriyel yaygınlığı olan cam elyaf takviyesine göre daha mukavemetli olması, erozyon direncini geliştirerek erozif aşınma dayanımına olumlu katkı sağladığı şeklinde yorumlanmıştır.

Şekil 5 detaylandırıldığında gözümüze çarpan ve saha kullanımına etki etmesi ve veri aktarımına katkı sağlaması hedeflenen temel bir çıktı da çarpma hızlarındaki değişimin erozyon oranında sağladığı etkiyi oransal değişkenlikle karşılamaması olmuştur. Yani çarpma hızındaki 23, 28, 34 ve 53 m/s değerleri deney seti üzerinde tanımlanan “Basınç regülatörü” vasıtasıyla “Akış kontrol valfleri” özelinde “Manometre” ile sonuçlanan ayarlamalar vasıtasıyla temelde 1, 1.5, 2 ve 3 bar değerleri ile ayarlanan basınçların çift disk metodunda karşılıkları belirlenmiştir. Çarpma hızındaki yaklaşık %25, %50 ve %100 oranlarında gerçekleştirilen artışlar sonunda 23 m/s hız ve 45° çarpma açısındaki deneyler referans alınarak deneylerde kullanılan 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarındaki erozyon oranlarının artışı sırasıyla %44.2, %203.9 ve %330.6 seviyelerinde olduğu belirlenmiştir.

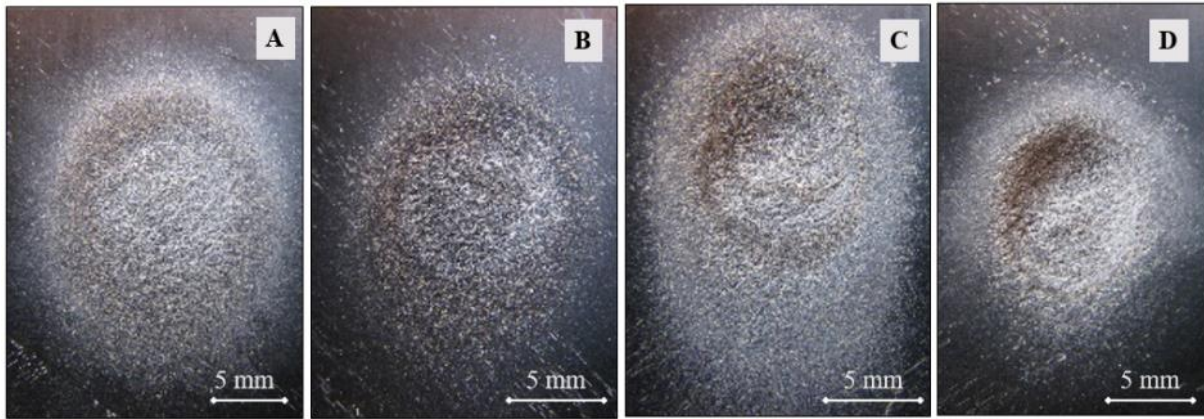
Sonuçların optik mikroskop görüntüleri ile desteklenerek yorumlanması aşamasında ise çarpma açısının farklılığının BET/EP kompozit boru deney numunelerindeki etkileri Şekil 6, 7, 8 ve 9’da detaylandırılarak farklı çarpma hızlarına ait aşındırılan bölgeler özellikle karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Şekil 6’de 30° çarpma açısı özelinde dört farklı çarpma hızına ait aşınmış yüzeylerin erozif aşınma sonucundaki yüzeysel değişimlerine ait farklılıklar değerlendirildiğinde çarpma açısının önemi yanında bu açı için hız

etkisindeki baskınlık ciddi seviyelerde gerçekleşerek yüzeyden koparılan bazalt elyaf ve epoksi kaybını gözler önüne serecek seviyede gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. 30° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

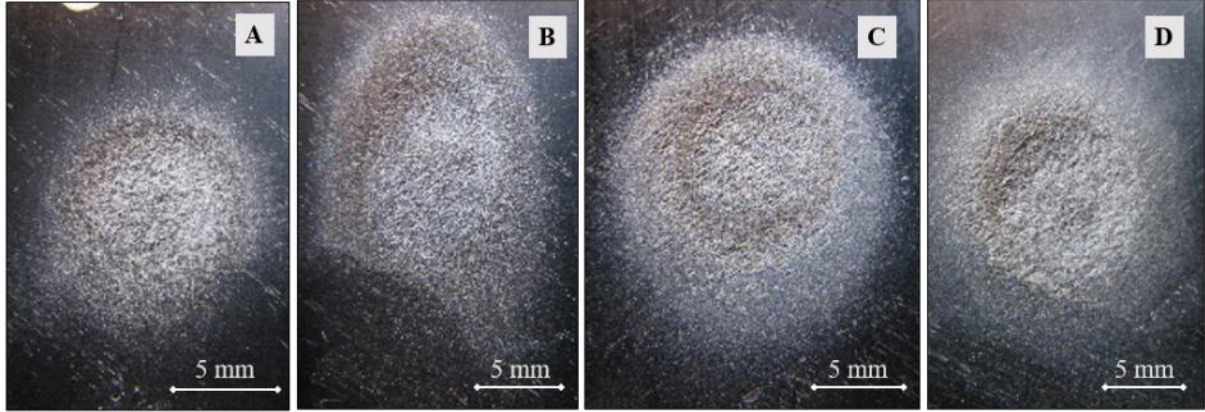
Şekil 7 oluşturulurken bu deneysel çalışmanın temel farkındalığını oluşturan çarpma açısına odaklanılmış olup yani 45° çarpma açısındaki 23, 28, 34, 53 m/s çarpma hızlarına ait aşınma sonucunda deformasyon etkisi gözlemlenen yüzeylerdeki koparılan deney numuneleri kıyaslamaları üzerine odaklanılmıştır. Gözle görülebilen ve stereo mikroskop görüntüleri ile elde edilen farklılıklar değerlendirildiğinde çarpma açısının malzeme davranışı üzerine etkisinin de ortaya çıkması şeklinde yorumlanmıştır. Yani literatür uyumluluğundaki seviye açısından yapılan değerlendirmede erozyon oranını artırması sonucunda yarı sünek malzeme etkisinin oluşmasına sebep olan 45° çarpma açısı önemi net olarak ortaya konulmuştur. Açısız etki yanında hız etkisi tekrar rolde artış etkisini baskın moda ortaya koyarak hız artışı eroziv aşınmayı hızlandırmakla birlikte hızlarda meydana gelen artışın oransal boyutun (23-28 m/s dönüşümü ile 34-53 m/s dönüşümü bu sonuca örnek olarak verilebilir) çok daha üzerinde yüzeylerden malzeme koparma etkisini sağladığı sonucunu ortaya çıkarmıştır.



Şekil 7. 45° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

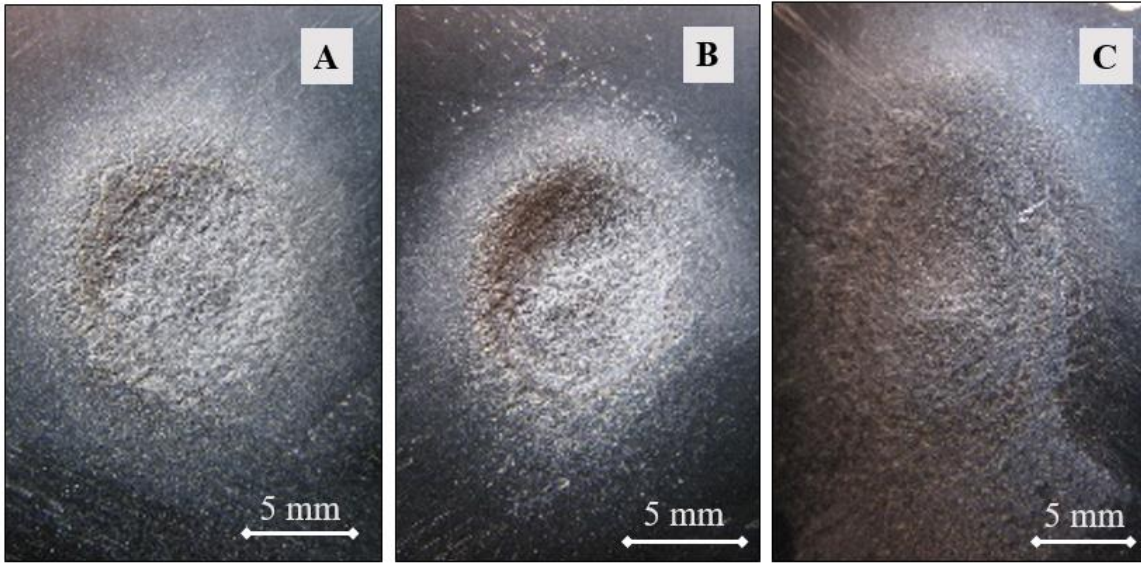
Özellikle aşındırıcı partikül çarpma hızındaki etkinin üzerine odaklanılan bu deneysel çalışmada üç çarpma açısından ulaşılan sonuç göstermiştir ki 45° açının 60° açığa dönüşümü sonunda ortaya çıkan etki, yarı sünek malzeme sergileme rolünün baskınlaştırılarak 60° çarpma açısında minimum erozyon oranının ortaya çıkmasıyla sonuçlanmıştır. Bu sonuç mikroskop görüntülerine de yansımış olup yüzeyden koparılan bazalt elyaf ve epoksi malzemelerin koparılmasındaki azalmayla ortaya çıkmıştır. Özellikle 34 ve 53 m/s gibi 23 ve 28 m/s hız etkisine göre daha net yüzeysel koparma etkisinde bu farklılık daha belirleyici seviyelerde ortaya çıkmış olup Şekil 8 detayları da belirtilen farklılığı destekleyecek görsellere etki etmiştir. Yapılan deneylerden varılan nokta değerlendirildiğinde kompozit boru deney numunelerindeki yarı sünek malzeme

etkisi gösterme etkinliği açısız dönüşümde ispatlandığı için 90° çarpma açısında deney yapmaya doğrudan gerek duyulmamış ve deneysel süreç belirtilen açılarla sınırlanmıştır.



Şekil 8. 60° çarpma açısında ve farklı çarpma hızında aşınmış yüzeyler; a) 23 m/s, b) 28 m/s, c) 34 m/s, d) 53 m/s

Dört farklı çarpma hızı etkisindeki erozyon oranlarının değişimlerinin verildiği Şekil 5 incelenerek en baskın farklılıkların gözlemlendiği 53 m/s aşındırıcı partikül çarpma hızına sahip deneyler sonunda en geniş aşınmış yüzey alanına sahip olan deney numunelerinin 45° çarpma açısında olduğu Şekil 9’de verilen stereo mikroskop görüntüleri ile tekrar ortaya konulmuştur. Bu etkinin ve sonucun ortaya çıkmasında 45° çarpma açısının kosinüs bileşenine bağlı olarak daha yüksek bir yüzey kazıma etkisinin oluşmasının rol oynadığı şeklinde yorumlanmıştır.



Şekil 9. Çarpma hızının 53 m/s olduğu farklı açıların aşınmış yüzeyleri; a) 60°, b) 45°, c) 30°

Deneysel sonuçların grafik üzerine aktarılması yanında optik mikroskop görüntülerine ait elde edilen destekleyici tüm veriler sonucunda çarpma açısı ve partikül hızının erozyon verimliliği üzerine etkisinin boyutunun da belirlenmesi amaçlanarak aşağıdaki yol haritası izlenmiştir.

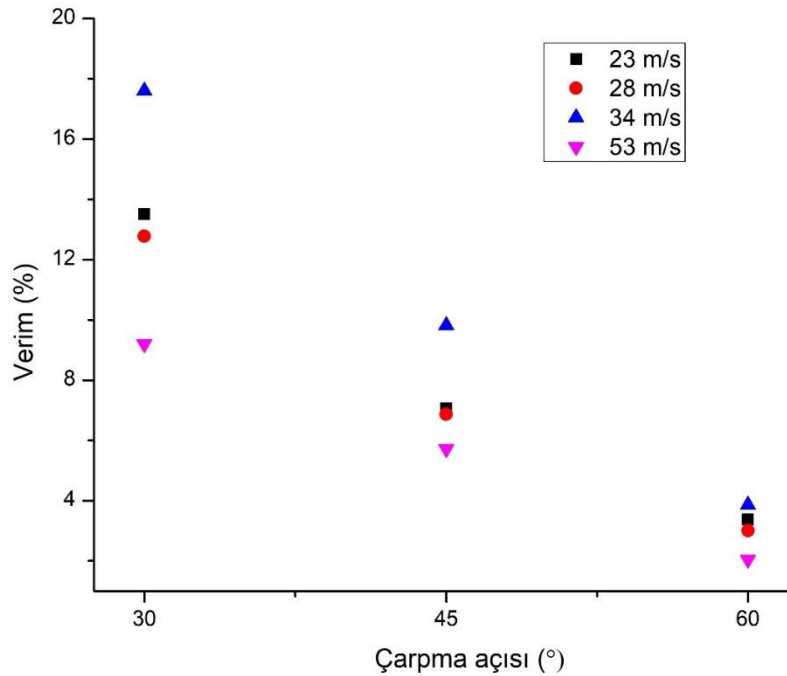
Katı partikül erozyon aşınması sonucunda aşındırılan malzemenin verimliliği malzemeye ait aşınma modelinin kırılmalı bir aşınma modeli mi yoksa sünek bir aşınma modelini olduğunu belirlemede kullanılan bir terimdir [31, 32]. Erozyon aşınmasında verim [33];

$$\eta = (2 * E * H) / (\rho * v^2 * \sin^2\alpha) \quad (2)$$

eşitliği kullanılarak belirlenmektedir. Bu eşitlikteki; E: erozyon oranı (mg/kg), H: kompozit deney numunesinin sertliği (Pa), ρ : kompozit deney numunesinin yoğunluğu (kg/m³), v: aşındırıcı partikülün çarpma hızı (m/s) ve α : çarpma açısıdır (°).

Yüzeyden herhangi bir kırılma olmaksızın parça ayrılmasının gerçekleştiği durum için sıfır erozyon verimliliği ifadesi kullanılmakla birlikte aşındırıcı kazınmasına bağlı olarak kırılma etkisinin gözlemlendiği erozyon verimliliğinde % 0–6 aralığı sünek davranışı, % 6–40 aralığı ise yarı sünek davranış olarak tanımlanır [34].

Şekil 10'daki grafik (2) numaralı eşitlik kullanılarak oluşturulmuş olup 23, 28, 34 ve 53 m/s çarpma hızlarının verimlilik karşılaştırması üzerine yapılan karşılaştırmalı değerlendirme sonucunda erozyon verimliliğine doğrudan ve belirleyici etkilerin 34 ve 53 m/s çarpma hızları önceliğinde gerçekleştiği belirlenerek bu sonucun çarpma hızları özelinde erozyon direncine doğrudan etkisi olarak yorumlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki numune yüzeyinden ayrılmaların, aşındırıcı partikül çarpma hızında değişimin belirleyici olduğu hızlarda gerçekleşmesi gayet anlamlı bulunarak yüksek hız etkisinde kırılmadan ziyade gömülme rolündeki baskınlıkla bağlantılı olarak verimlilik seviyesi düşük gerçekleşmiştir. 34 m/s'deki yüksek oran ise hızın nispeten daha düşük olması ile birlikte partikül etkisi yüzeye gömülmeden ziyade kırılma ve koparma rolüyle özdeşleşerek verimliliği yükseltmiştir.



Şekil 10. BET/EP kompozit boruların erozyon verimliliğine çarpma hızının etkisi.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Katı partikül erozyon aşınmasının boru iç yüzeyinde oluşturduğu etkinin çarpma hızı ve çarpma açısı değişimi özelinde sorgulandığı deneysel içeriğe sahip bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- CNC filament sarım makinesinde üretilen $[\pm 55]_4$ yönelimli BET/EP kompozit boruların iç yüzey aşındırıcı temasına gösterdikleri direnç literatürde ilk kez boru uygulaması özelinde irdelenmiştir.
- Parametrik veri özeli değerlendirildiğinde bazalt elyaflar için 10 N elyaf gerilimi, ortalama 11 mm bant genişliği ve $[\pm 55]_4$ sarım konfigürasyonu önceliklendirilmiştir.
- Boru içi eksenel partikül akışının simüle edildiği deneysel çalışma sonucunda hız artışının erozyon direncini azalttığı ve erozif aşınma kaybında artışa sebep olduğu görülmüştür.
- Çarpma açısındaki değişime ait veriler incelenerek literatürde de yarı sünek aşınma olarak tanımlanan forma uygun bir BET/EP kompozit boru iç yüzey erozif aşınması modeline ulaşıldığı belirlenmiştir.

- Erozyon verimliliğinde ise belirleyici etki 34 ve 53 m/s çarpma hızlarında gerçekleşmiş olup 34 m/s hızda deney numunesi yüzeyine gömülmeden ziyade kırılma ve koparma rolü baskınlaşarak verimliliği yükseltmiştir.
- Çarpma açısı ve çarpma hızının etkinliğinin aşınmış kompozit boru yüzeylerine ilişkin farklılıkları özelindeki kıyaslamada ise yarı sünek malzeme etkinliği sergileme rolü numunelerde özellikle ispatlanarak 45°'nin önemi yanında 53 m/s anlamlılığı üzerine stereo mikroskop görüntülerinin belirleyici sonuçlar ortaya koyduğu yorumları yapılmıştır. Görüntüler özellikle hız etkinliğinde ve açısal olarak bazalt elyafların epoksi matriste oluşturduğu çatlama, kırılma, gömülme ve kopma etkileri özelinde detaylıca sorgulanmış ve destekleyici aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Gonabadi, H., Olia, A., Yada, A., Bull, Steve. (2022). Fatigue life prediction of composite tidal turbine blades. *Ocean Engineering*, 260, 111903.
- [2] Fenner, J.S., Daniel, I.M.(2014). Hybrid nanoreinforced carbon/epoxy composites for enhanced damage tolerance and fatigue life. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 65, 47-56.
- [3] Meng, F., Cui, Y., Pickering, S., McKechnie. (2020). From aviation to aviation: environmental and financial viability of closed-loop recycling of carbon fibre composite. *Composites Part B: Engineering*, 200, 108362.
- [4] Mieloszyk, M., Majewska, K., Ostachowicz, W. (2021). Application of embedded fibre bragg grating sensors for structural health monitoring of complex composite structures for marine applications. *Marine Structures*, 76, 102903.
- [5] Abedi, M., Fanguero, R., Correia, A.G. (2021). A review of intrinsic self-sensing cementitious composites and prospects for their application in transport infrastructures. *Construction And Building Materials*, 310, 125139.
- [6] Chen, M., Weng, Y., Semple, K., Zhang, S., Jiang, X., Ma, J., Fei, B., Dai, C. (2021). Sustainability and innovation of bamboo winding composite pipe products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 144, 110976.
- [7] Luo, S., Wei, J., Xu, W., Chen, Y., Huang, H., Hu, J., Yu, Q. (2022). Design, preparation, and performance of a novel organic-inorganic composite coating with high adhesion and protection for concrete. *Composites Part B: Engineering*, 234, 109695.
- [8] Durmuşçelebi, F.M., Özdemir, Ö., Fırat, M. (2021). İçme suyu dağıtım sistemlerinde sızıntı yönetimi ve şebeke rehabilitasyonu için fayda maliyet analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(6), 660-668.
- [9] Türkkkan, G.E., Atakul, F. (2020). İçme suyu şebeke hattının farklı boru tipleri için tasarımı ve maliyeti: erzurum ili horasan ilçesi örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 8(2), 1521-1532.
- [10] Zheng, Y., Sun, D., Feng, Q., Peng, Z. (2022). Nano-Sio2 modified basalt fiber for enhancing mechanical properties of oil well cement. *Colloids And Surfaces A: Physicochemical And Engineering Aspects*, 128900.
- [11] Sepetcioglu, H. (2021). Experimental study on the effect of graphene nanoplatelets on the low-velocity impact response of prestressed filament wound basalt-based composite pressure vessels. *Polymer composites*, 42(10), 5527-5540.
- [12] Demircan, G., Mustafa, Ö., Murat, K. (2020). Flexural properties of glass fiber reinforced epoxy composites at different strain rates. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 22(64), 271-276.

- [13] Karaçor, B., Özcanlı, M. (2022). The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(2), 439-448.
- [14] Imrek, H., Demet, S.M. (2014). Experimental investigation of wear behaviors of bronze and carbon-reinforced polytetrafluoroethylene alloy pivot pin bearings. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology, 228(10), 1187-1194.
- [15] Maslavi, A., Hüseyin, Ü., Yetgin, S.H. (2022). Karbon fiber takviyeli grafit ve ptfe katkılı poli-eter-eter-eton (peek) polimer kompozitin tribolojik performanslarına kayma hızının etkisinin belirlenmesi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 457-467.
- [16] Yetgin, S., Çolak, M. (2020). Grafit katkılı polipropilen kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. El-Cezeri Journal Of Science And Engineering, 7(2), 649-658.
- [17] Yenigün, B., Kılıçkap, E. (2020). Ketp kompozitlerin delinmesinde delme parametrelerinin çekme kuvvetine etkisinin varyans analizi ile incelenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 11(1), 215-223.
- [18] Şimşek, İ., Şimşek, D., Özyürek, D. (2020). Yarı katı kalıplama yöntemi ile üretilen farklı miktarlarda sic takviyeli a356 matrisli kompozit malzemelerin aşınma performansının incelenmesi. Politeknik Dergisi.
- [19] Karakurt, N.F., Sağbaş, A. (2020). Tepki yüzeyi tasarımı ve yapay sinir ağları yaklaşımı uygulanarak epoksi matrisli kompozit malzemenin aşınma dayanımının tahmini ve modellenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 25(3), 1325-1344.
- [20] Vahdettin, K., Demirel, M. (2019). Epoksi reçine-Mgo polimer matrisli kompozit malzemelerin üretilmesi ve pin on disk abrasiv aşınma özelliklerinin incelenmesi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31(1), 1-10.
- [21] Gökçe, N., Şevki, E., Subaşı, S. (2020). Hibrit polimer matrisli ve cam lifi takviyeli polimer kompozitlerin çekme özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 8(4), 872-883.
- [22] Chen, C., Liu, X., Zhou, Q.Q., Ma, Y.Y. (2022). Effect of basalt fiber on the thermal conductivity and wear resistance of sintered wc-based diamond composites. International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials, 105, 105829.
- [23] Balaji, K.V., Shirvanimoghaddam, K., Rajan, G.S., Ellis, A.V., Naebe, M. (2020). Surface treatment of basalt fiber for use in automotive composites. Materials Today Chemistry, 17, 100334.
- [24] Arslan, G., Fidan, S., Sinmazcelik, T. (2018). Solid particle erosion behavior of carbon fiber-metal wire hybrid reinforced polymer composites. Journal Of Science And Engineering, 5(1), 182-190.
- [25] Maity, P., Sarkar, B. (2020). An exploratory analysis for erosion wear behavior of filler materials of hybrid composites: a de novo approach. Measurement, 166, 108232.
- [26] Yadav, R., Lee, H.H., Meena, A., Sharma, Y.K. (2022). Effect of alumina particulate and e-glass fiber reinforced epoxy composite on erosion wear behavior using taguchi orthogonal array. Tribology International, 107860.
- [27] Bağci, M. (2016). Determination of solid particle erosion with taguchi optimization approach of hybrid composite systems. Tribology International, 94, 336-345.
- [28] Cai, F., Zhang, Y., Wang, J., Zheng, J., Wang, Q., Zhang, S. (2021). Improved adhesion and erosion wear performance of crsin/cr multi-layer coatings on ti alloy by inserting ductile cr layers. Tribology International, 153, 106657.

- [29] Wang, Y.F., Yang, Z.G. (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, 265(5-6), 871-878.
- [30] Desale, G.R., Gandhi, B.K., Jain, S. (2006). Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials. *Wear*, 261(7-8), 914-921.
- [31] Jena, H., Pradhan, A.K., Pandit, M.K. (2018). Study of solid particle erosion wear behavior of bamboo fiber reinforced polymer composite with cenosphere filler. *Advances In Polymer Technology*, 37(3), 761-769.
- [32] Harsha, A., Thakre, A.A. (2007). Investigation on solid particle erosion behaviour of polyetherimide and its composites. *Wear*, 262(7-8), 807-818.
- [33] Patnaik, A., Satapathy, A., Mahapatra, S.S., Dash, R.R. (2009). Tribo-performance of polyester hybrid composites: damage assessment and parameter optimization using taguchi design. *Materials & Design*, 30(1), 57-67.
- [34] Arjula, S., Harsha, A. P. (2006). Study of erosion efficiency of polymers and polymer composites. *Polymer Testing*, 25(2),188-196.



Photoresponse of the Al/n-Si Schottky Diode with Nanorod ZnO Interface Layer Prepared Using Hydrothermal Method

Neslihan TURAN , orcid no: 0000-0001-8933-2762

Gazi University, Faculty of Science, Department of Physics, 06500, Yenimahalle/Ankara/TÜRKİYE

Article Info

Research article
Received: 7.10.2022
Revision: 1.11.2022
Accepted: 9.11.2022

Keywords

Hydrothermal
Zinc oxide
Photovoltaic
nanorod

Abstract

In this study, ZnO nanorods (ZnO-NR) were prepared on n-Si wafer by hydrothermal method. Structural and morphologic properties of ZnO nanostructures were investigated through XRD and SEM method. The illumination impacts on the current-voltage (I-V) measurements of the prepared Al/ZnO-NR/n-Si diode were explored in the dark and different illumination intensities (20–100 mW/cm²) between ± 1.5 V bias voltage range. The Schottky diode barrier height value had an increasing trend with increasing illumination intensity from 20 to 100 mW/cm² while the ideality factor had a decreasing trend with the increase of photocurrent. The temporary photocurrent increases as illumination intensity increases. The slope (α) of the $\log I_{ph} - \log P$ curve was obtained as 0.618 and this slope confirmed that this ZnO nanorod shows photoconducting behavior. The short-circuit current (I_{sc}) and open-circuit voltage (V_{oc}) values were obtained to be 774.08 μ A and 0.24 V under 100 mW/cm² illumination intensity, respectively. The prepared Al/ZnO-NR/n-Si diode showed both photodiode and photovoltaic properties under different light intensities. It was concluded that the prepared Al/ZnO-NR/n-Si diode can be used in the optoelectronic applications, especially for the photodiode industry.

1. INTRODUCTION

In metal-semiconductor (MS) structures, the interfacial layer between the MS structure will affect many parameters of the diode, and changes in the thickness and concentration of the interface material affect the electrical behavior of the structure. The study of changes in the properties of MS structures using many materials as interfaces still attracts great interest. By using different production techniques and various materials, doped or layered structures are obtained and the changes in the electrical properties of these structures are examined. ZnO is a well-known semiconductor and functional material used in many places such as chemical sensors, conductivity electrodes, photoelectric devices, and solar cells, etc. The development of photovoltaic technology is to increase the efficiency of cells and reduce the cost of production, making them more suitable for various applications.

It can be produced by many methods such as physical [1–4] (ball milling, chemical and physical vapor deposition, lithographic, laser ablation, etc.), chemical (solution-oriented synthesis, gas phase reaction) and biological methods, and the properties of nanostructures change according to the production methods. Compared to other methods, solution-oriented methods show advantages such as low production cost, scalability, ease of application, and relatively low temperatures (<200 °C) are required for production. Due to these advantages, solution-oriented methods attract attention and ZnO can be produced by hydrothermal/solvothermal [5–7], precipitation, sol-gel [8], chemical bath deposition [9, 10], and electrochemical deposition [11]. Because there are too many effects in solution-oriented methods, the nanoscale effects are different, and ZnO can be produced in different structures such as nanorods [12], nanoflowers [13, 14], nanoarrays [15, 16], and nanospheres [17, 18]. The electrical conductivity and optical properties of ZnO change with the change of their morphological structure. ZnO nanorod structures attract research attention due to their large surface area, low cost and ease of use in potential applications in optoelectronic fields. ZnO nanorods can be produced effectively using the hydrothermal method [19]. ZnO

nanowires/nanorods are used in various nanodevice applications such as solar cells [20], nanogenerator [21], field emitters [22], gas sensors [23], and UV detectors [24].

In this article, the Al/ZnO-NR/n-Si/Al device was prepared using the hydrothermal method, and it was investigated whether it is practical for photovoltaic devices with I-V measurements in the range of ± 1.5 V in the dark and various illumination intensities.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, ZnO-NR were synthesized on n-Si wafer by hydrothermal method. Before the growth of ZnO-NR, a thin ZnO seed layer was coated on the surface of n-Si wafer. First n-type Si wafer (orientation 100, thickness 525 μm , and resistivity 1-20 $\Omega\cdot\text{cm}$) was cleaned with an ultrasonic cleaner using cleaning steps with chloroform, acetone, and methanol. The oxide structure was removed using a mixture of HF-deionized water (1:10), rinsed with deionized water, and dried. Aluminum (99.99% purity) was evaporated as a ohmic contact on the back of the wafer under 10^{-6} Torr vacuum using the thermal evaporation system.

Secondly, the seed layer was prepared by spin coating technique using zinc acetate dihydrate ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), methanol, and NaOH precursors. Zinc acetate dihydrate was dissolved in 100 ml methanol on the magnetic stirrer. Then, NaOH (33%) was dropped slowly to the 0.02 M zinc acetate dihydrate solution. The solution was stirred at 60°C for 2 h on magnetic stirrer. The resultant transparent solution was cooled room temperature and was dropped on n-Si wafer. 500 rpm for 5 s and 3000 rpm for 30 s were chosen as the spin coating parameters. After the coating, the substrate was annealed at 130°C for 5 min in oven and this coating procedure was repeated four times.

For the hydrothermal process, ZnO was prepared using Zinc acetate dihydrate, deionized water, and ammonia (25%). Zinc acetate dissolved in deionized water (0.05 M), then 1.5 ml ammonia dropped slowly in the solution on magnetic stirrer. Wafer inserted into teflon container with the seed layer side down, and the solution was added to hydrothermal system which was set to 90 °C for 12 h. After the system cooled down to room temperature naturally, wafer was taken out of the hydrothermal system, rinsed with deionized water, and dried. Finally, For the Al/ZnO-NR/n-Si/Al structure, the top contact was obtained by deposition of Al with a thickness of 150 nm and a diameter of 2.75 mm, under 10^{-6} torr pressure, with a thermal evaporation system. Schematic representation of experimental procedure is shown in Fig. 1.

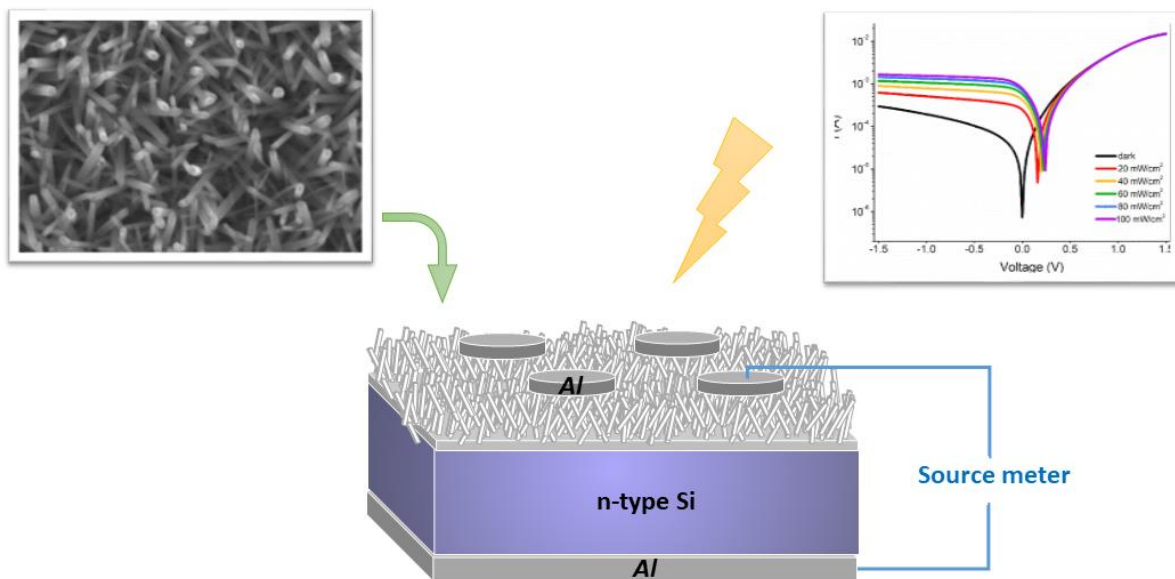


Fig. 1. Schematic representation of experimental procedure

The crystallographic and morphologic properties of ZnO-NR were characterized by Bruker D8 Advance diffractometer and FE-SEM (Hitachi SU5000) respectively. The (I-V) measurements of the Al/ZnO-NR/n-Si/Al in ± 1.5 V bias voltage range was performed under the dark and various illumination intensities using the FYTRONIX solar simulator and Keithley 2400 at room temperature.

3. RESULTS

The surface morphology of the sample identified by FE-SEM is shown in Fig 2. a and b are the surface views above, and c is the cross-section view. It was observed that nanorods were formed on the surface and their orientation was random in the c direction. When the c-oriented nanorods in Figure 2b were examined, it was seen that the ZnO nanorods had a hexagonal structure. The thickness of the ZnO nanorod layer on the surface is approximately 350–400 nm, as can be seen in the cross-sectional view in Figure 2c.

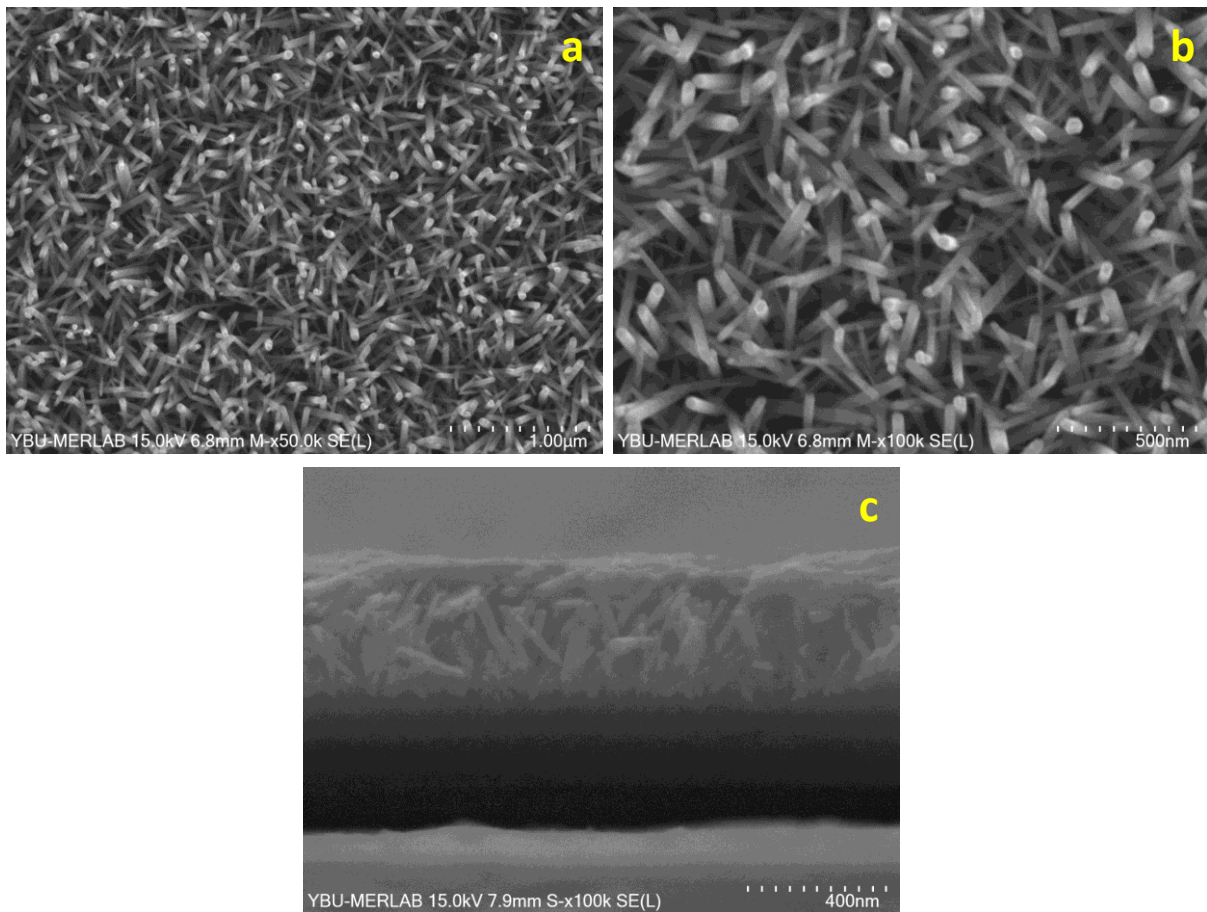


Fig. 2. SEM images of the Al/ZnO-NR/n-Si structure a) X50k b) X100k c) cross-section view

Fig. 3 shows the XRD pattern of ZnO-NR grown on n-Si recorded in the range of $2\theta=10-80^\circ$. The diffraction peak of the (002) of ZnO-NR was marked in the diffraction pattern. The peak is compatible with the JCPDS 36-1451 pdf card belonging to ZnO hexagonal wurtzite (space group $P6_3mc$). The peak belonging to the n-Si in the XRD diffraction pattern were also observed.

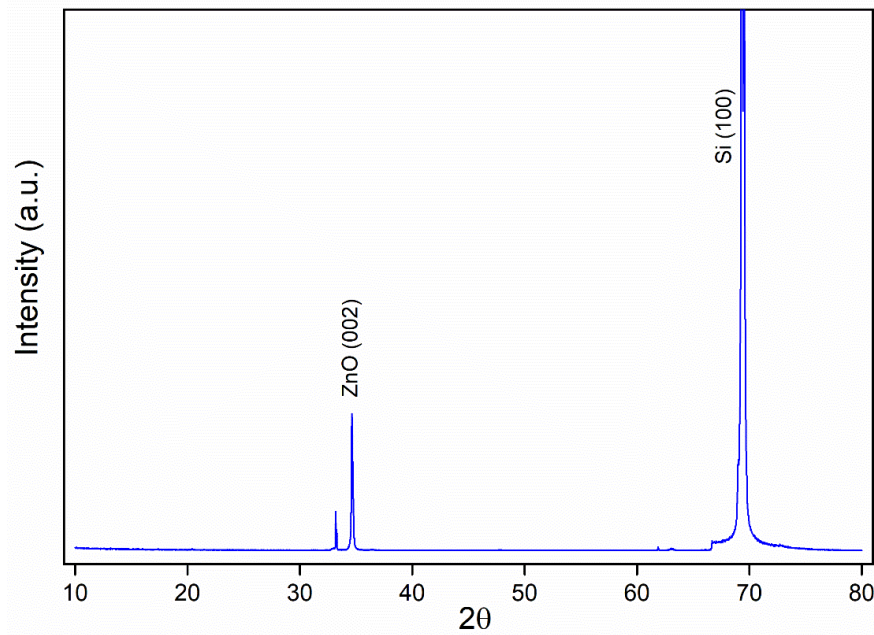


Fig. 3. XRD pattern of the Al/ZnO-NR/n-Si structure

The current-voltage (I - V) measurements of the fabricated Al/ZnO-NR/n-Si Schottky diode according to thermionic emission (TE) theory were investigated from in dark and various illumination intensities. The current-voltage equation in reverse and forward bias can be defined by the following relation [25–29]

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (1)$$

Where

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_B}{kT}\right] \quad (2)$$

where Φ_B is the Schottky barrier height, k is the Boltzmann constant, q is the charge of electron, T is the absolute temperature, n is the ideality factor, A^* is the effective Richardson constant of $112 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ for n-Si, A is the area of effective diode and I_0 is the saturation current of reverse. From the forward bias $\ln I$ - V measurement by using Eq. 1 and Eq. 2, the barrier height and ideality factor of the fabricated sample can be estimated using the Eq. 3 and Eq. 4 [30–32]

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3)$$

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4)$$

The logarithmic current-voltage (I - V) measurements of the ZnO-NR film deposited in Al/n-Si interface, including the illustration of the between $\pm 1.5 \text{ V}$ and in the illumination intensity range of 20 – 100 mW/cm^2 and in dark are indicated in Fig 4.

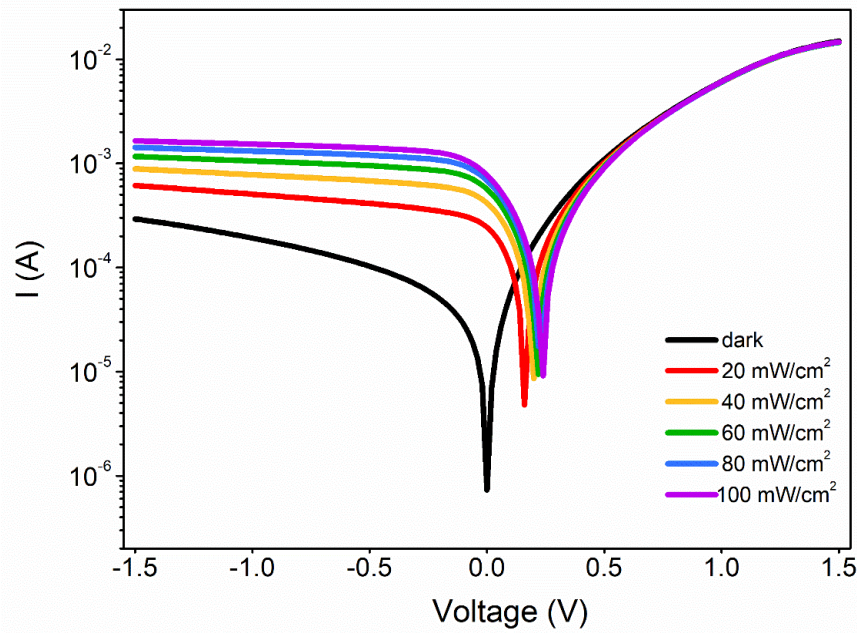


Fig. 4. Current-voltage characteristics of Al/ZnO-NR/n-Si dark and under various illumination intensities

As can be seen from the forward bias part of Fig. 4, the *I-V* curve shifts toward the positive voltage as the illumination intensity increases. This situation corresponds to photovoltaic behavior. The dark characteristics of the produced Al/ZnO-NR/n-Si diode showed good rectification behavior. While the ratios of the forward current and reverse current in the dark and 100mW/cm² intensity are 50.9 and 8.9 at 1.5 V, respectively. As can be seen from the different illumination characteristics in Fig. 4, the produced diode showed both photodiode properties in reverse bias and photovoltaic properties in forward bias. Using Eq. 3 and Eq. 4, *n*, Φ_B , and *I*₀ values were calculated in the dark and at various illumination intensities and are given in Table 1.

Table 1. Variation of electrical parameters with various illumination intensity of Al/ZnO-NR/n-Si Schottky diode

| Illumination intensity (mW/cm ²) | <i>n</i> | Φ_B (eV) | <i>I</i> ₀ (μA) | <i>I</i> _{ph} (μA) | <i>R</i> _s (Ω) | <i>R</i> _{sh} (Ω) | <i>V</i> _{oc} (V) | <i>I</i> _{sc} (μA) |
|--|----------|---------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 0 | 2.92 | 0.631 | 15.40 | ----- | 84.4 | 5955 | ----- | ----- |
| 20 | 2.49 | 0.672 | 3.13 | 613 | 89.5 | 5462 | 0.16 | 244 |
| 40 | 2.28 | 0.693 | 1.38 | 887 | 91.2 | 5206 | 0.20 | 417 |
| 60 | 2.05 | 0.713 | 0.64 | 1161 | 92.8 | 5003 | 0.22 | 566 |
| 80 | 1.97 | 0.728 | 0.37 | 1423 | 93.5 | 4844 | 0.22 | 685 |
| 100 | 1.66 | 0.758 | 0.11 | 1646 | 94.4 | 4628 | 0.24 | 774 |

The fourth region data of the *I-V* measurements are shown in Fig. 5. The open circuit voltage (*V*_{oc}) and short circuit current (*I*_{sc}) values are determined from the points where the curves of *I-V* intersect the voltage and current axis, respectively. As observed in Fig. 5 and Table 1, the *I*_{sc} and *V*_{oc} values increase as illumination intensity increases. For example, the values of *I*_{sc} and *V*_{oc} are found 244 μA and 0.16 V for 20 mW/cm² and 774 μA and 0.24 V for 100 mW/cm², respectively. This depicts that the Au/ZnO-NR/n-Si Schottky diode is completely sensitive to illumination intensity and shows photovoltaic behavior.

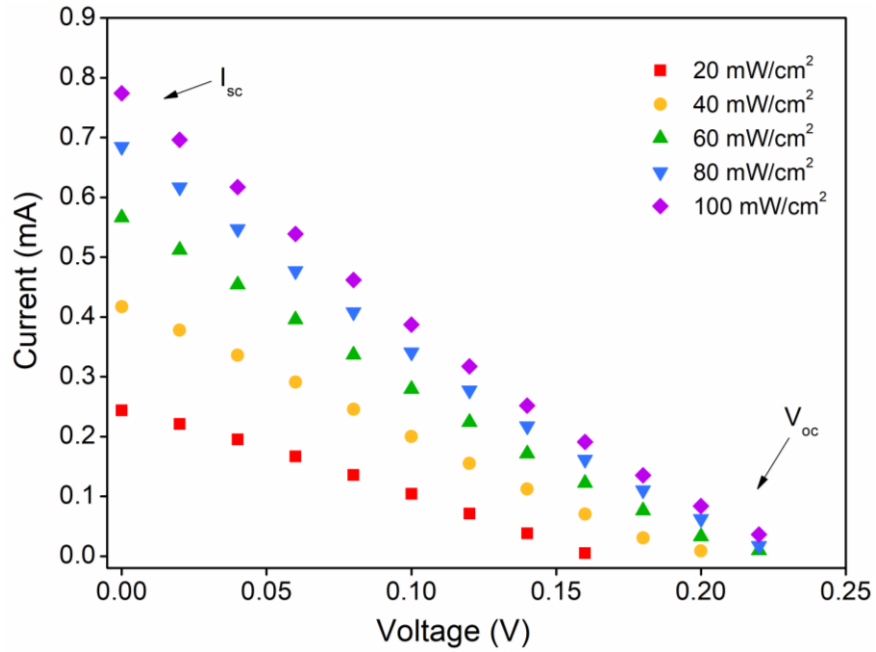


Fig. 5. I-V plots for the Al/ZnO-NR/n-Si Schottky diode

As the illumination intensity increases, the n and I_0 values decrease, while the Φ_B value increases. For example, The n values decreased from 2.92 in the dark to 1.66 at 100 mW/cm² and the Φ_B values increased from 0.631 eV in the dark to 0.758 eV at 100 mW/cm². It was determined from Fig. 4 that the diode produced due to the photocurrents (I_{ph}) increasing in reverse bias as illumination intensity increases was a photodiode. I_{ph} values for 20 mW/cm² and 100 mW/cm² were found as 613 μ A and 1646 μ A, respectively.

Both the series resistance (R_s) in the forward bias and the shunt resistance (R_{sh}) in the reverse bias affect the electrical properties of the produced diode. R_s and R_{sh} values were found by Ohm's law ($R_i = dV/dI$) and are illustrated in Table 1 and Fig. 6.

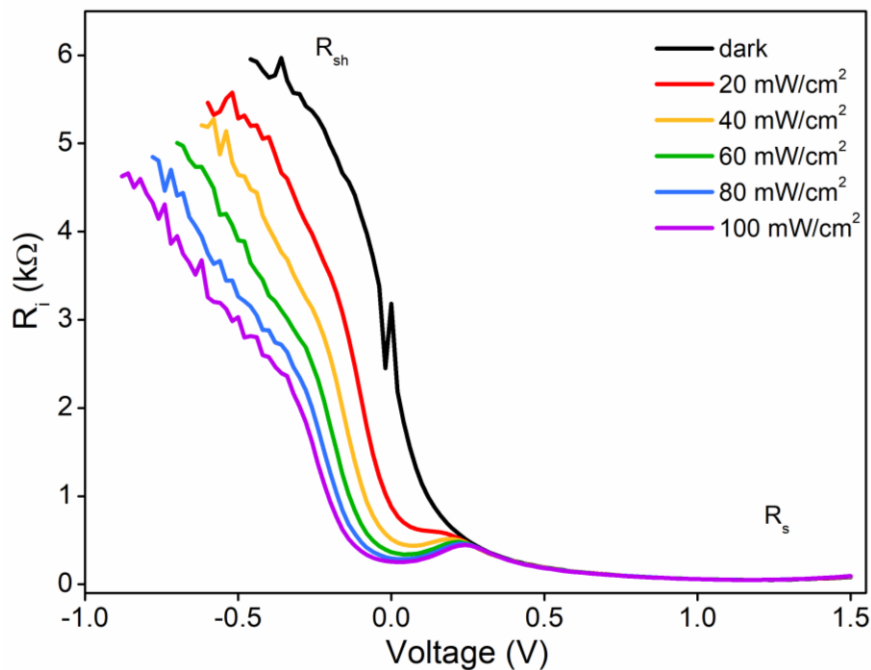


Fig. 6. The R_i -V plots at dark and under various illumination intensities

While R_s values almost do not change under illumination, R_{sh} values decrease with increasing illumination intensity. Hence, R_s values in dark and 100 mW/cm^2 were found as 84Ω and 94Ω at 1.5V for the produced diode, respectively. R_{sh} values in dark and 100 mW/cm^2 were found as 5748Ω and 2578Ω at -0.4V for the produced diode, respectively.

In addition to the I - V measurements, current-time (I - t) measurements were performed under different illumination intensities to investigate the photosensitivity of the produced diode at -1V and are illustrated in Fig 7. From Fig. 7, it has been observed that the current increases when the light is on and decreases when the light is off. That is, the photocurrent for Al/ ZnO-NR /n-Si diode was observed when the light was on. This photocurrent increased as the light intensity increased from 20 to 100 mW/cm^2 . This behavior is due to charge trapping at deep levels [33].

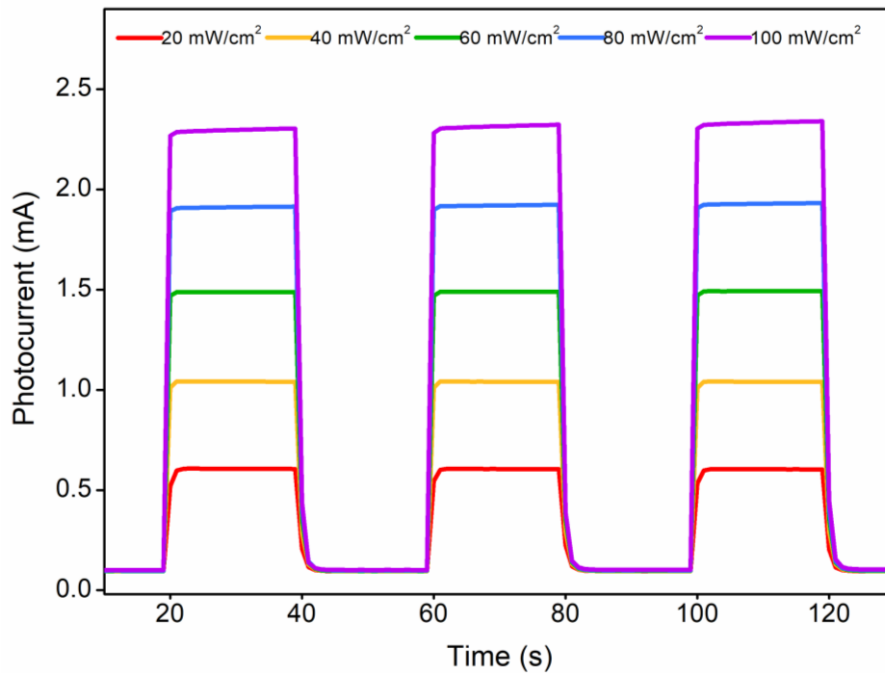


Fig. 7. Transient photocurrent characteristics of Al/ZnO-NR/n-Si at various illumination intensity.

To determine the variation of the photoconduction via the various illumination intensity, the double-logarithmic photocurrent (I_{ph}) versus illumination intensity (P) at -1.5V was plotted and shown in Fig. 8. The mechanism of photoconduction can be found by the Eq. 5 [34].

$$I_{ph} = P^\alpha \quad (5)$$

Where, α , I_{ph} , and A are a power exponent, the photocurrent, and a constant, respectively.

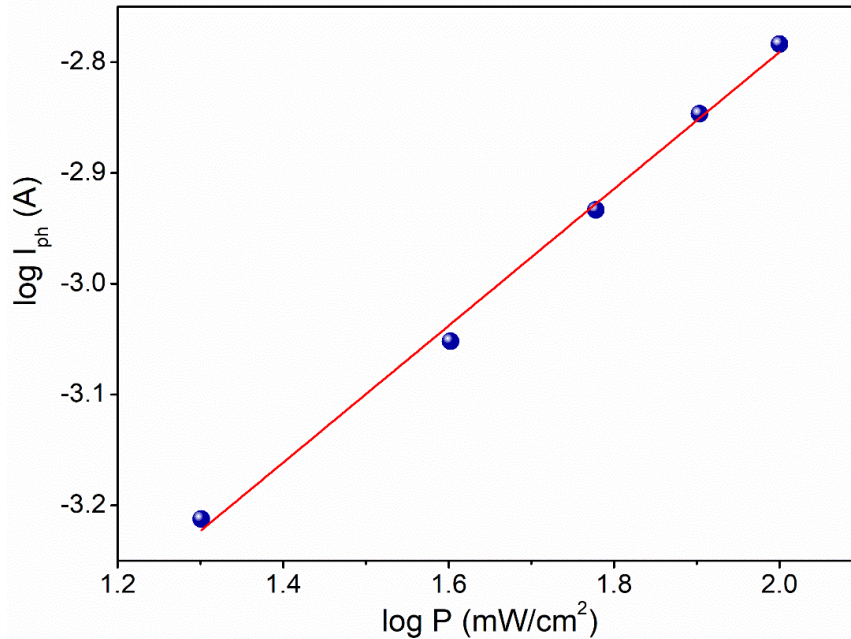


Fig. 8. $\log(I_{ph})$ vs $\log(P)$ plot for the Al/ZnO-NR/n-Si

The α value was found from the slope of the $\log I_{ph}$ - $\log P$ curve and obtained as 0.618. The linear variation of the photocurrent from Fig. 8 is due to trapping of charge carriers at deep levels [35].

4. CONCLUSIONS

ZnO nanorods were successfully produced on n-Si by hydrothermal method. It has been observed by SEM images that the diameter of the hexagonal ZnO nanorods is around 60 nm and the thickness on the surface is approximately 350–400 nm. In XRD analysis, the characteristic 002 peak of the hexagonal wurtzite structure of ZnO nanorods was observed. The reverse and forward bias current-voltage (I - V) characteristics of the prepared Al/ZnO-NR/n-Si photodiode have been analyzed under dark, 20, 40, 60, 80, and 100 mW/cm² illumination intensity at room temperature. The main electrical parameters such as, n , Φ_B , I_0 , I_{ph} , R_s , R_{sh} , V_{oc} , and I_{sc} of the fabricated Schottky barrier diode were investigated. It was observed that as the illumination intensity increased, the n values decreased and the Φ_B values increased. The results showed that the electrical parameters are sensitive to illumination intensity and the Al/ZnO-NR/n-Si Schottky barrier diode has photovoltaic and photodiode properties. It is concluded that the produced diode can be used as a photodiode in optoelectronic applications.

REFERENCES

1. Hamid N, Suhaimi S, Othman MZ, Ismail WZW (2021) A Review on Thermal Evaporation Method to Synthesis Zinc Oxide as Photocatalytic Material. *Nano Hybrids Compos* 31:55–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/NHC.31.55>
2. Skowronski L, Ciesielski A, Olszewska A, et al (2020) Microstructure and optical properties of E-beam evaporated zinc oxide films-effects of decomposition and surface desorption. *Materials (Basel)* 13:1–17. <https://doi.org/10.3390/MA13163510>
3. Müller R, Gelme O, Scholz JP, et al (2020) Epitaxial ZnO layer growth on Si(111) substrates with an intermediate AlN nucleation layer by methane-based chemical vapor deposition. *Cryst Growth Des* 20:6170–6185. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00907>
4. Naveed A, Haq U, Nadhman A, et al (2017) Synthesis Approaches of Zinc Oxide Nanoparticles:

- The Dilemma of Ecotoxicity. <https://doi.org/10.1155/2017/8510342>
5. Cheng K, Cheng G, Wang S, et al (2007) Surface states dominative Au Schottky contact on vertical aligned ZnO nanorod arrays synthesized by low-temperature growth. *New J Phys* 9:. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/7/214>
 6. Yi F, Huang Y, Zhang Z, et al (2013) Photoluminescence and highly selective photoresponse of ZnO nanorod arrays. *Opt Mater (Amst)* 35:1532–1537. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2013.03.018>
 7. Shao Z, Li X (2016) Direct-current piezoelectric nanogenerator based on p-Si/n-ZnO heterojunction. *Phys E Low-Dimensional Syst Nanostructures* 77:44–47. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2015.11.003>
 8. Sheikhi S, Aliannezhadi M, Shariatmadar Tehrani F (2022) Effect of precursor material, pH, and aging on ZnO nanoparticles synthesized by one-step sol–gel method for photodynamic and photocatalytic applications. *Eur Phys J Plus* 137:. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-02252-8>
 9. Maria G, Mari D, Mineo G, et al (2022) Low-Cost , High-Yield ZnO Nanostars Synthesis for Pseudocapacitor Applications. 1–13
 10. Azmi ZH, Mohd Aris SN, Abubakar S, et al (2022) Effect of Seed Layer on the Growth of Zinc Oxide Nanowires by Chemical Bath Deposition Method. *Coatings* 12:. <https://doi.org/10.3390/coatings12040474>
 11. Serrà A, Zhang Y, Sepúlveda B, et al (2019) Highly active ZnO-based biomimetic fern-like microleaves for photocatalytic water decontamination using sunlight. *Appl Catal B Environ* 248:129–146. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.02.017>
 12. Hajjiamali Z, Khayatian A, Almasi Kashi M (2020) Etching of ZnO nanorods by ZnO nanoparticles and adjustment of morphological and UV photodetection properties. *J Sol-Gel Sci Technol* 95:109–118. <https://doi.org/10.1007/s10971-020-05287-y>
 13. Liao F, Han X, Zhang Y, et al (2017) Hydrothermal synthesis of flower-like zinc oxide microstructures with large specific surface area. *J Mater Sci Mater Electron* 28:16855–16860. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-7602-2>
 14. Wang Y, Li X, Wang N, et al (2008) Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities. *Sep Purif Technol* 62:727–732. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.03.035>
 15. Rivera VF, Auras F, Motto P, et al (2013) Length-dependent charge generation from vertical arrays of high-aspect-ratio ZnO nanowires. *Chem - A Eur J* 19:14665–14674. <https://doi.org/10.1002/chem.201204429>
 16. Kwon J, Hong S, Lee H, et al (2013) Direct selective growth of ZnO nanowire arrays from inkjet-printed zinc acetate precursor on a heated substrate. *Nanoscale Res Lett* 8:1–6. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-489>
 17. Saleh SM (2019) ZnO nanospheres based simple hydrothermal route for photocatalytic degradation of azo dye. *Spectrochim Acta - Part A Mol Biomol Spectrosc* 211:141–147. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.11.065>
 18. Bakrudeen HB, Tsibouklis J, Reddy BSR (2013) Facile fabrication of mesoporous ZnO nanospheres for the controlled delivery of captopril. *J Nanoparticle Res* 15:. <https://doi.org/10.1007/s11051-013-1505-9>

19. Zhang Y, Ram MK, Stefanakos EK, Goswami DY (2012) Synthesis, characterization, and applications of ZnO nanowires. *J Nanomater* 2012:.. <https://doi.org/10.1155/2012/624520>
20. Wibowo A, Marsudi MA, Amal MI, et al (2020) ZnO nanostructured materials for emerging solar cell applications. *RSC Adv* 10:42838–42859. <https://doi.org/10.1039/d0ra07689a>
21. Le AT, Ahmadipour M, Pung SY (2020) A review on ZnO-based piezoelectric nanogenerators: Synthesis, characterization techniques, performance enhancement and applications. *J Alloys Compd* 844:156172. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156172>
22. Chen HW, Yang HW, He HM, Lee YM (2015) ZnO nanorod arrays prepared by chemical bath deposition combined with rapid thermal annealing: Structural, photoluminescence and field emission characteristics. *J Phys D Appl Phys* 49:.. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/2/025306>
23. Jagadale SB, Patil VL, Vanalakar SA, et al (2018) Preparation, characterization of 1D ZnO nanorods and their gas sensing properties. *Ceram Int* 44:3333–3340. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.116>
24. Kwon DK, Porte Y, Ko KY, et al (2018) High-Performance Flexible ZnO Nanorod UV/Gas Dual Sensors Using Ag Nanoparticle Templates. *ACS Appl Mater Interfaces* 10:31505–31514. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b13046>
25. Rhoderick EH, Williams RH (1988) *Metal-Semiconductor Contacts*. Clarendon Press, Oxford
26. Iwai H, Sze SM, Taur Y, Wong H (2013) *MOSFETs*. Wiley, New York
27. Kaplan N, Taşçı E, Emrulloğlu M, et al (2021) Analysis of illumination dependent electrical characteristics of α - styryl substituted BODIPY dye-based hybrid heterojunction. *J Mater Sci Mater Electron* 16738–16747. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-06231-8>
28. Şahin MF, Taşçı E, Emrulloğlu M, et al (2021) Electrical, photodiode, and DFT studies of newly synthesized π -conjugated BODIPY dye-based Au/BOD-Dim/n-Si device. *Phys B Condens Matter* 614:.. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413029>
29. Tezcan AO, Eymur S, Taşçı E, et al (2021) Investigation of electrical and photovoltaic properties of Au/n-Si Schottky diode with BOD-Z-EN interlayer. *J Mater Sci Mater Electron* 32:12513–12520. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05886-7>
30. Turut A, Karabulut A, Ejderha K, Biyikli N (2015) Capacitance-conductance-current-voltage characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS structures. *Mater Sci Semicond Process* 39:400–407. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.025>
31. Tuğluoğlu N, Koralay H, Akgül KB, Çavdar (2016) Analysis of inhomogeneous device parameters using current–voltage characteristics of identically prepared lateral Schottky structures. *Indian J Phys* 90:43–48. <https://doi.org/10.1007/s12648-015-0722-8>
32. İlhan M, Koç MM, Coşkun B, et al (2021) Cd dopant effect on structural and optoelectronic properties of TiO₂ solar detectors. *J Mater Sci Mater Electron* 32:2346–2365. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-05000-3>
33. Özcan E, Topaloğlu Aksoy B, Tanriverdi Eçik E, et al (2020) Fabrication of hybrid photodiode systems: BODIPY decorated cyclotriphosphazene covalently grafted graphene oxides. *Inorg Chem Front* 7:2920–2931. <https://doi.org/10.1039/d0qi00468e>
34. Bouricha B, Souissi R, Bouguila N, et al (2019) Positive and negative photoconductivity in sprayed β -In₂S₃ thin films. *Mater Res Express* 6:116456. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab51c7>

35. Yakuphanoglu F, Aslam Farooq W (2011) Photoresponse and electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si. *Mater Sci Semicond Process* 14:207–211.
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2011.02.017>



The Place and Importance of Artificial Intelligence in the Gastronomy Sector

Hatice TÜRKOĞLU^{1,*} Gül YILMAZ¹

¹Istanbul Topkapi University, Faculty of Fine Arts, Desing and Architecture, Gastronomy and Culinary Arts Department, 34197, Yenibosna/Istanbul

Article Info

Review article
Received: 3.11.2022
Revision: 22.11.2022
Accepted: 22.11.2022

Keywords

Gastronomy
Tourism
Smart Systems
Artificial Intelligence
Deep Learning

Abstract

The demand for artificial intelligence in the world is increasing day by day in the gastronomy sector. In this study, the importance of artificial intelligence in the gastronomy sector is emphasized and the studies on this subject are mentioned. Since the studies in the literature are limited, studies on all sub-branches related to artificial intelligence-based gastronomy and tourism are mentioned. The number of studies related to gastronomy and artificial intelligence in the literature is limited. Therefore, in this study, artificial intelligence applications used in the gastronomy sector are detailed under the subheadings of cuisine, promotion, health, and forecasting. Accordingly, approximately 40 articles were analyzed considering these subheadings. In light of the information obtained from these studies, artificial intelligence systems to be developed in the gastronomy sector will provide great gains. Moreover, it is estimated that meeting consumer expectations and using innovative technologies in the gastronomy sector will increase the popularity of gastronomy science.

1. INTRODUCTION

With the development of technology, access to information has become easier and a new era has begun. Limited information has been eliminated and a transition to the world of information has been made; creativity and innovation have come to the fore. The development of technology has taken the sectors one step further and caused rapid and radical changes. In this age in which the use of technology has become a necessity, it is observed that businesses that cannot update themselves and adapt to technology will find it very difficult to hold on to the sector and will not be able to continue their lives.

In the gastronomy sector, businesses need to offer goods and services by the desires and wishes of the consumer. The changing needs of the consumer require businesses to offer different and creative methods in a competitive environment [1-2]. The field of artificial intelligence, which provides creative and different methods, directly affects the gastronomy sector.

Nowadays, since artificial intelligence is used in many fields, many applications have been made in this field. Artificial intelligence is used in agriculture, marketing, science, advertising, health, and many other sectors. In this study, artificial intelligence, which is related to many sectors, is included in the studies related to the field of gastronomy. In the study, a literature review was conducted on the subject. These article studies were evaluated, and their characteristics were examined by considering the artificial intelligence applications related to the field of gastronomy. As a result, this article is intended to be a comprehensive study that includes the importance and applications in the field of artificial intelligence-based gastronomy and to be a pioneer for similar studies.

In the article's following sections, the definition and history of gastronomy and artificial intelligence are given in Section 2, and Section 3, respectively. Section 4 is detailed the importance of artificial intelligence in the gastronomy sector. Artificial intelligence applications used in the gastronomy sector are presented

under subheadings in Section 5. Finally, the results from the previous studies and the future studies that are being planned are discussed in Section 6.

2. GASTRONOMY

The word gastronomy originated in Greek. The word gastronomy is derived from the combination of the words gaster (stomach) and nomos (law). The difficulty of defining a concept in social sciences is also encountered when defining gastronomy. In the simplest sense, gastronomy is defined as the law or craft of stomach regulation [3-4]. Gastronomy also means stomach science.

Conceptually, the use of gastronomy can be traced back to the 4th century BC in the historical process. The book written by Joserh Berchoux in French in 1801, translated into Turkish as “Gastronomy ya da Sofradaki Tarla İnsanı”, is the first book with the word gastronomy in its title [4].

When we examine the definitions of gastronomy, the famous gastronomy Brillant Savarin stated that “Gastronomy is the systematic study of everything related to human nutrition” [5-6]. When we examine another definition, Çavuşoğlu (2011) explains gastronomy as an art of eating and drinking that examines the relationship between the cultures of societies and their food [7]. The most basic definition of gastronomy is to meet the eating and drinking needs of people to continue their vital activities [1]. Eating and drinking, which is our physiological need, and is at the bottom of Maslow’s hierarchy of needs, is not only meeting the needs of people today but also taking pleasure from food, where we consume food, and many factors [6, 8].

Considering food as a work of art and presenting it beautifully is an aspect that reveals creativity. For this reason, gastronomy provides aesthetic experiences in the preparation and presentation stages of food. Looking at gastronomy from the perspective of art, Baysal and Küçükaslan (2009) defined the concept of gastronomy as culinary art [6, 9].

The concept of gastronomy has a multidisciplinary structure, and the concept of gastronomy has a relationship with many branches of science. The concept of gastronomy also contributes to the fields it cooperates with and expands its range. The foundation of artificial intelligence, which is one of the remarkable applications of today’s age, was laid in 1950. Artificial intelligence studies, which are popular application areas, are related to the gastronomy sector as well as many other fields [6]. Today, the use of artificial intelligence in the food and beverage sector has provided convenience for the sector and has also changed traditional methods. When artificial intelligence is associated with gastronomy, it can provide less human error, less waste, fast service, customer satisfaction, and many benefits [10].

3. ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Historically, the concept of artificial intelligence was first used by John McCarthy in 1956 at a conference held in Dortmund [11,12]. Artificial intelligence has many application areas and is among the topics researched by different disciplines. Therefore, the concept of artificial intelligence can be defined in many different ways. Artificial intelligence refers to the operation and development of cognitive functions such as reasoning, visual perception, voice recognition, problem-solving, learning, and decision-making, which are human-specific features with the help of computer models, and the operation and development of intelligent machines and software controlled by computers [4,13-14]. Artificial intelligence is a branch of engineering that paves the way for computer-controlled machines, robots, or software that thinks with intelligence [4, 15-16]. Artificial intelligence flows into the human brain and examines how a human learns, how they make decisions and how they solve a problem. It then builds on this knowledge by developing intelligent software and systems based on the results [4, 17].

Although the 1950s are taken as the basis in the literature as the period when artificial intelligence emerged, it is observed that machines similar to artificial intelligence applications were made in previous periods. In the 13th century, Abul Iz Al-Jazari made machines such as encrypted keys, automatic ablution, and water closets in the Artuqid palace [10,18]. When we look at the first studies on artificial intelligence in Turkey, Turkey’s first five-axis robot was produced by Hakan Altunay at Istanbul Technical University in 1990. Likewise, the industrial robot produced at the first technology center in Turkey in 1994 is also the first in this field [10, 19].

Aydın (2017) classified artificial intelligence in terms of its purposes and examined it as scientific purpose, educational purpose, and engineering purposes [20]. The scientific purpose of artificial intelligence aims to understand learning, find practical solutions, and create strategies through computer models by examining intelligence. When we look at the educational purpose, it aims to keep the information in the human mind with various simulation software such as learning, understanding, and gaining the ability to solve problems. When we look at the purpose of engineering, it includes the production of programs and robots that can think and decide like humans to make people's lives easier [4]. When we look at these purposes of artificial intelligence, it is seen that production is mostly made for engineering purposes in the gastronomy sector. As gastronomy is intertwined with the fields of kitchen, cooking, service, food, and restaurant in the use of artificial intelligence, it is observed that studies are carried out in these fields.

4. THE IMPORTANCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE GASTRONOMY SECTOR

A new era has begun with the prominence of technology in the developing world order. During this period, revolutionary changes and transformations have been experienced in all sectors. These technological developments in the world increase the demand for artificial intelligence. This demand has led to radical changes in the field of gastronomy, and artificial intelligence products have taken their place in many businesses. Technological applications such as robots, smart menus, and advice robots used in the field of gastronomy in artificial intelligence applications have provided many benefits to the sector. The most prominent of these benefits is the elimination of human-induced errors and faster work, saving time and cost and contributing to increased work efficiency.

Artificial intelligence-modeled robots are used to perform difficult, dangerous, and repetitive tasks for humans. Robots affect the staffing of enterprises and reduce costs. However, it is observed that artificial intelligence, which is costly when considered in the short term, is preferred by large and well-established companies in the sector [10].

5. ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS USED IN THE GASTRONOMY SECTOR

The demand for artificial intelligence in the world is increasing day by day. Today, there is almost no area where artificial intelligence is not used. Therefore, artificial intelligence technologies affect many fields [6,21]. As in many fields, it has started to be used successfully in the gastronomy sector. Looking at the contributions of artificial intelligence applications to the gastronomy sector; it is understood that it provides advantages such as classification in foods, minimizing the cost of high-cost and labor-intensive processes, reassuring prediction, ensuring the safety of food and beverage, and standardizing the product [6].

Artificial intelligence in gastronomy has applications in classification and prediction. In the classification part, artificial neural networks, machine learning, and deep learning methods are generally used. Using these methods, studies such as quality control classification, product recognition, and food safety detection are carried out [22]. For example, the process of setting aside damaged rice grains and broken ones during production in rice production factories. In terms of business, it prevents loss of time and prevents possible wrong or missing products from being released to the market. Fuzzy logic, regression analysis methods, and optimization methods are used in prediction studies. With these methods, predictive studies such as the cooking time of foods, product yield estimation, and determination of sales times of foods are carried out [6,23]. For example, fuzzy logic is used to determine the cooking time of foods, the classification of pears according to the degree of hardness, and the classification of eggplant according to quality criteria.

The use of artificial intelligence applications in gastronomy is categorized under the headings of cuisine, promotion, health, and prediction. These areas are detailed in sub-headings.

5.1. Kitchen

The concepts of gastronomy and cuisine are often confused and sometimes used interchangeably. Gastronomy is in a general sense and covers the whole process of food from seed to soil in an abstract sense. Cuisine, on the other hand, covers the preparation, cooking, and presentation of food and deals with more concrete issues [24,25].

The relationship between gastronomy, which is related to many disciplines due to its multidisciplinary characteristic, and cuisine is only one of them [24]. While the kitchen is more concerned with the preparation of products, how they are cooked and their presentation, gastronomy deals with issues such as the methods of cooking, what to use, how long it should be, and how long it should take, and explains which combinations should be revealed and is a guiding science [24,26].

Gastronomy has not been a discipline, but a multidisciplinary science. The reason is that it has influenced and been influenced by so many fields that it does not fit into any boundaries. History, chemistry, psychology, sociology, sociology, economy, health, artificial intelligence, robotics, technology, and many other fields are fed and affected [24].

There are many artificial intelligence-based studies in the field of cuisine. A few of these studies are summarized below:

- Şahin and Ağaoğlu (2020) aimed to make predictions about the cooking condition of meat with the system they designed [6]. As a result of the study, the cooking rate of the meat was determined by analyzing the values entered by the user of the program into the system with the rule base inference method. A fuzzy logic model was used. It was determined that the program was 92% successful and can be used safely in the food and beverage sector. It was determined that the most important factor affecting the cooking rate of meat is temperature. Therefore, since the temperature and time intervals can be predicted with the help of the system, the losses experienced will be minimized and customer satisfaction will be ensured.
- Çerkez and Kızildemir (2020) conducted a study in a restaurant where artificial intelligence and robotics technology was applied [10]. The qualitative research method was used in the study, and it was aimed to reveal the impact of technology use on consumers and what kind of expectations are in which age frequencies. Consumers' behavior was observed, and it was found that robots attracted the attention of all age groups. The smart table application, on the other hand, attracted more interest from children than young people. At the same time, smart tables are not used functionally during meals. Another observed result was that traditional methods were preferred when ordering food. According to the results of the research, these applications, which are new in our country, should be followed and adapted to other applications in the world. In this way, not only technology will not lag, but also changing consumer expectations will be met. In addition, it will contribute to the development of the sector.
- Sugiura et al. (2010) designed a cooking system that works in an open space [27]. In this system, various ingredients are poured into the pot on the induction cooker and a meal is cooked with the heat setting adjusted according to the user's instructions. To realize the cooking function, both robot and human features are specified in the common working part of the system. Small mobile robots are utilized in the system to save money and increase flexibility and safety. These small robots have tasks such as transporting uncooked food, and spices and stirring the pot. The cooking process is started by selecting the recipe from the recipe book. The functioning of the designed system: First, the system user prepares the ingredients according to the instructions, puts them on the plate, and places the relevant visual on the plate. Mobile robots memorize the product on the plate with the help of signs. The user puts water in the pot, places it on the stove, and presses the start button, the ingredients are placed in the pot respectively. The heat is preset and the system alerts when cooking is complete. When the system was tested, it was observed that the food was cooked successfully.

In the gastronomy sector, artificial intelligence products are used in robot chefs. Robotics is the common field of study of engineering branches that deal with the construction, design, and use of robots to do the work done by humans [4,28]. In the literature, it is considered a sub-branch of artificial intelligence. There are many studies where robotics and gastronomy meet. A few of the robots working in kitchens are detailed below:

- Looking at the examples of robots used in kitchens; Moley company is the company that produces the world's first fully automatic and intelligent cooking robot "Robotic Chef", as seen in Figure 1 [29]. It was produced for the first time in 2015. The design of this product consists of robotic arms, an oven, a cooker, and a touchscreen unit. Other items are stovetops, food processors, dishwashers,

basic appliances, and kitchen utensils. The cooking techniques of Chef Tim Anderson, who won the title of BBC Master Chef, were recorded in the system and defined to the robot, and thanks to its advanced arm, it can cook more than a hundred dishes. The robotic kitchen can be operated with a smartphone or touch screen. In 2015, it won the best of the best award at the Asian Consumer Electronics Fair [6,10,29].



Figure 1. Robot assisting called *Robotic Chef* [29]

- “Bot Chef”, which is designed as another example of a robot assisting the chef with artificial intelligence support, was produced by Samsung, as seen in Figure 2 [30]. Among the functions of the Bot Chef, it is observed that it can perform mixing, pouring, cleaning and chopping operations. The design of the robotic arm is inspired by the human arm and has six levels of freedom with its diameter, accessibility, and safety. The robotic arm can be operated through simple and intuitive voice commands. The platform of basic artificial intelligence and machine learning skills enables users to easily perform the assigned task using voice control, physical manipulation, and application-based controls. Thus, they can create new skills. New skills can be downloaded, customized, and shared online. The Bot chef can understand the location of the objects and direct them by telling the robot with a voice command [4,30].



Figure 2. Robot assisting called *Bot Chef* [30]

- Among the other robots produced, “Foxbot” cuts noodles and cleans itself; “AUSCA” is one of the robots used in the kitchen with an artificial intelligence product that can pour oil into the pan, break eggs and finally make and serve the omelet [31,32].

These studies and robots produced in the field of the kitchen in the gastronomy sector are very beneficial to the sector in the field of artificial intelligence. It has reduced costs and parallel stress by providing savings in the kitchen area. It has minimized human errors by increasing efficiency and saving time by being faster and more planned in the kitchen. In addition to these benefits, when we look at the risks, developing and implementing artificial intelligence is costly. It is necessary to upgrade the applications used to keep up with the ever-evolving technology and this requires payment. In addition, the use of artificial intelligence applications instead of humans can create unemployment problems [10,31].

In the future, it is expected that intelligence will become widespread in the culinary field and many more innovations will be seen. Instead of the content of recipes, technological processes will be patented. Artificial intelligence will have the ability to analyze and synthesize information about food, beverages, ingredients, and flavors, exceeding human capacity. It is predicted that artificial intelligence will create

food varieties and recipes other than human recipes. Artificial intelligence chefs could become very popular in the future and create entirely new categories of cuisine and beverages. If medical and health information is provided, it is thought that it will be able to benefit at the highest level in terms of health [33].

5.2. Promotion

Gastronomy supports and feeds the field of tourism. Likewise, gastronomy also benefits from tourism through gastronomy tourism, which is one of the alternative tourism types. Thus, there is a mutual interaction. Gastronomy tourism has a very important place in the economy of many countries. Gastronomy also increases local consumption and has a positive economic impact on the people. To ensure the continuity and sustainability of tourism, support from gastronomy are required. Along with the tourism products of the regions, food and beverage products, tourist products, local dishes, herbs, and spices produced in the region should be promoted. These elements that will contribute to the development and branding of regions can be promoted with artificial intelligence applications [34]. Branding will be realized and promoted by ensuring that the region is mentioned with food and beverages specific to the region. The number of studies conducted with artificial intelligence in this field is limited and should be expanded.

Ergün and Öztürk (2018) created a hierarchical ontology model including recipes, food categories, and ingredient types (Figure 3) [22]. For the first time, a semantic data analysis of Turkish dishes was performed for Turkish Cuisine and a database consisting of 50 varieties and 800 images was created. The features, recipes and pictures of the dishes were collected and associated. Using the deep learning model, the dishes can be searched faster with automatic recognition.



Figure 3. A hierarchical ontology model [22]

Chen et al. (2017) created a large-scale image dataset for Chinese food recognition (Figure 4) [35]. This dataset contains more than 180,000 labeled food images with 208 categories. Later, using this dataset, they developed a deep model called ChineseFoodNet based on Convolutional Neural Networks. In the experimental results, an accuracy score of 81.43% was obtained.



Figure 4. Data Set images [35]

Razali et al. (2021) developed a local food recognition model to promote gastronomy tourism [36]. In their proposed model, they used pre-trained deep architectures based on the transfer learning approach. VIREO-Food172 and Sabah Food datasets were used to evaluate the food recognition model and experimental results showed accuracies of 94.01% and 86.57%, respectively. Similarly, Jiang et al. (2020) developed a multiscale deep neural network for food recognition [37]. High-level semantic features, mid-level features, and deep visual features were obtained from food images. Then, a hybrid model is presented by combining these features. In the experimental studies, pre-created datasets containing 3 large food images were used (Figure 5). As a result, an average accuracy of 95% was achieved using the proposed model. Similar to these previous studies, Khan et al. [38], Chen et al. [39], Min et al. [40], Kumar Dey et al. [41], and Shifat et al. [42] used a deep learning approach based on convolutional neural networks for local food recognition and ingredient detection.

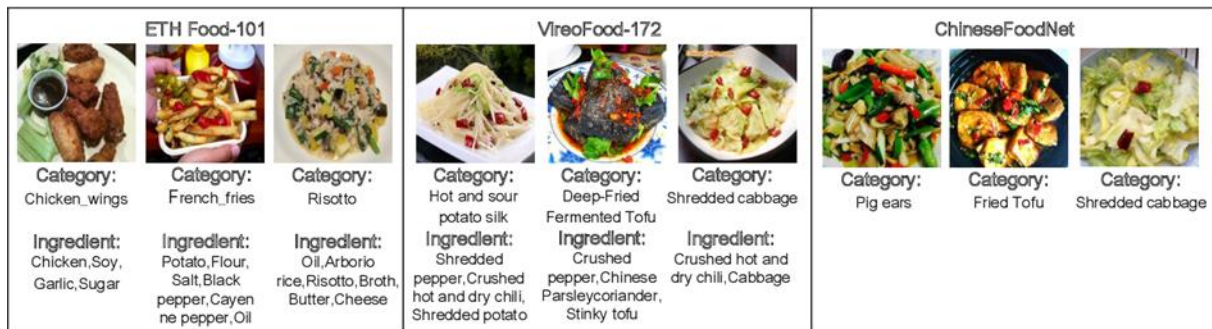


Figure 5. Images of the data set used [37]

In addition to the above studies, there are already mobile/web applications in the field of gastronomy related to food recognition in the world. Some of these applications are as follows:

- The Calorie Mama app [43] is a culturally diverse app that provides food identification and information on the nutritional content of the identified dishes.
- Yummly application [44] identifies food ingredients. It then lists the dishes that can be made with these identified ingredients.
- Logmeal application [45] performs food detection, recognition, and content detection from images. In this application, 880 food types from different regions have been identified.

5.3. Health

In food and beverage factories, enterprises, and kitchens, food hygiene and the personal hygiene of employees are very important. Companies like KanKan aim to contribute by using artificial intelligence to ensure and monitor this hygiene. With the help of cameras, KanKan monitors employees both in the kitchen and in the restaurant and observes their equipment for food safety and has also developed facial recognition and object recognition software that checks whether rules such as hand hygiene rules are applied. It has developed software that warns when these rules are violated [10].

Recommendation engines that enable consumers to make healthier food preferences and choices are one of the artificial intelligence applications. This method is aimed to determine people's preferences in line with the flavors they have tasted before. Founded in 2016 in Los Angeles, "Halla" was established to develop artificial intelligence that will enable consumers to make the right choices. It has emerged intending to help consumers by ranking restaurants by taking into account consumers' previous preferences and palate flavors. Another recommendation engine, "TellSpec", reflects the data about the content of the food, total calorie value, glycemic index and fat content of the food, etc. to the mobile phone application as a result of directing the device towards a food [10,46].

There are many artificial intelligence-based studies in food calorie estimation. These studies are summarized below:

- Poladzadeh et al. (2014) proposed a mobile cloud-based food calorie measurement system [47]. This system is a smart mechanism that allows consumers to track their food intake and monitor

their calorie counts. In experimental studies, images of 40 different foods and fruits were used to train the system. As a result, approximately 99% accuracy was achieved.

- Tanno et al. (2018) proposed an approach based on ESA and augmented reality for real-size estimation and food calorie estimation (Figure 4) [48]. Using augmented reality, the actual size of the dining area was measured by taking real-world coordinates as a three-dimensional representation. As a result, the accuracy of real-time calorie estimation is improved by using current technologies.



Figure 4. AR DeepCalorieCamV2 proposed by Tanno et al. (2018) [48]

- Ege and Yanai (2018) developed a CNN-based system that includes simultaneous food recognition and calorie calculation in images containing multiple foods [49]. The YOLOv2 model is used as a CNN-based object detector for this system. As a result, they achieved high speed and a small network size for food recognition and calorie estimation.
- Ege and Yanai (2018) proposed two approaches based on image-based estimation of the real size of foods for accurate food calorie estimation: DepthCalorieCam, and RiceCalorieCam [50]. DepthCalorieCam from these approaches, based on a food calorie estimation system with iPhone stereo cameras. On the other hand, RiceCalorieCam includes food size estimation by reference to rice objects. As a result, 90% or more success in estimating food calories was achieved in both approaches.
- Naritomi and Yanai (2020) presented a system based on image processing with AR / MR glasses for food calorie estimation [51]. They used deep learning-based Mask RCNN for food recognition, while AR / MR glasses were used for measuring the actual food size. In experimental works, authors achieved very successful results for food calorie estimation.
- Kumar et al. (2021) developed a hybrid system based on image processing methods for the recognition of food type and calorie estimation [52]. Authors and regions of interest are selected from food images, and the features such as color, shape, and texture are extracted. Then, at the classification stage, these features are fed as the input to the multilayer perceptron (MLP). The experiment results demonstrated that the proposed system produced a high performance for the recognition of food type and calorie estimation.

In the literature, there are limited studies based on image processing and machine learning methods similar to the above studies for food calorie estimation [53-55]. Contrary to all these studies, there are two studies based on food calorie estimation using different tools. These:

- Turmchokkasam and Chamnongthai (2018) presented a system based on thermal imaging for ingredient-based food calorie prediction [56]. The proposed model is based on the classification of food ingredients with the fuzzy logic method by using heat and intensities obtained from thermal images. Later, the classified ingredients are calculated for total calories based on area ratio and nutrition knowledge. As a result, they achieved acceptable results for food calorie estimation.
- Hu et al. (2022) proposed a mobile system called NIRSCAM based on Near-Infrared Sensing (NIR) using signal processing for food calorie estimation [57]. Experimental results demonstrated that they were more successful than previous studies based on image-based methods.

All studies on food calorie estimation were calculated using deep learning, machine learning, and image processing techniques. As a result, this is due to the camera distance measurement, the variable plate size, and the fact that the food is not on the plate in an orderly manner, making calorie calculation in real-time a difficult problem.

5.4. Prediction

In recent years, culinary culture and food and beverage diversity play an important role in the choice of country or city to be traveled to. Therefore, Turkish cuisine, which has a rich variety and delicious dishes, has a successful potential in terms of gastronomy tourism. Turkish cuisine is preferred by tourists in the tourism sector due to its characteristics. Food and beverage services, which are among the most revenue-generating departments in the tourism and accommodation sector, contribute to the strengthening and development of tourism [34,58].

Tourism demand prediction programs can be made using artificial intelligence applications. These prediction data provide foresight for both the public and private sectors and make important contributions to planning. It contributes to the distribution of resources and investments in the right areas, especially in pricing, promotion, and food and beverage sector planning. Accordingly, some of the studies on tourism demand forecasting in the literature are as follows:

- Çuhadar (2013) developed an artificial intelligence-based model for tourism demand prediction in Turkey [23]. This study, it is aimed to reach the highest prediction performance of Turkey's foreign tourism demand by using artificial neural network architecture. In experimental works, In the training phase of the proposed system, the monthly number of foreign tourists coming to Turkey between January 1987 and December 2012 was used. In the testing phase, a monthly foreign tourism demand forecast in 2013 was made for Turkey. As a result, they have achieved quite successful results for foreign tourism demand forecasting.
- Pai et al. (2014) proposed a novel hybrid system for forecasting tourism demand [59]. This system is based on a combination of fuzzy c-means and least-squares support vector regression. In addition, a Genetic algorithm was used for classifier parameter selection. In experimental works, they used data on tourist arrivals to Taiwan and Hong Kong. As a result, the proposed forecasting model was observed to be more successful than other methods.
- Law et al. (2019) presented a deep-learning method for forecast tourist demand [60]. The monthly Macau tourist arrival volumes were used to test the proposed approach. They achieved superior performance compared to other methods.

Similar to the above studies, Li et al. (2017) [61] and Chen et al. (2007) [62] proposed a novel approach to accurately forecast Chinese tourism demand. In these studies, it has been observed that successful results have been obtained for tourism demand.

6. CONCLUSION

Gastronomy is a multidisciplinary science. Many branches of science will contribute to the development of gastronomy science. With the development of technology, one of the most important of these disciplines has been artificial intelligence. New applications have started to be developed in the field of gastronomy using artificial intelligence technology. In the literature, the number of studies in which the field of artificial intelligence and the gastronomy sector meet is limited. In this study, studies on artificial intelligence-based gastronomy were investigated. These studies were evaluated under the subheadings of cuisine, promotion, health, and forecasting related to gastronomy, and approximately 20 international articles were analyzed. These articles are about problems such as robot chefs, food recognition, gastronomy tourism forecasting, safety issues, and calorie calculation. In conclusion, it is aimed that this study, which is prepared as a literature review, will be a pioneer for other studies planned to be carried out using artificial intelligence technologies in the field of gastronomy.

As a result of the information obtained from these studies, meeting consumer expectations in the field of gastronomy and using innovative technologies will provide great gains in the gastronomy sector. In the future, thanks to the artificial intelligence-based gastronomy industry, it is thought that the latest

technological systems will be developed for solving tedious, time-consuming, and low-performance problems.

REFERENCES

- [1] Eren D, Eroğlu S. Niğde ilinin gastronomi turizmi potansiyelinin değerlendirilmesi. Nevşehir HBV Üniversitesi Turizm Fakültesi, 122, (2019).
- [2] Uzun D. Bingöl İlindeki Turizm İşletme Belgeli Otel Restoranlarının Menü Mühendisliği Analizi. To & Re 2019, 1 (1) 9-14, (2019).
- [3] Lilholt, A. (2015). Entomological Gastronomy. Addison Lilholt
- [4] Uzan ŞB, Sevimli Y. Gastronomideki robotik uygulamalar ve yapay zekâ. Tourism and Recreation, 2(2), 46-58, (2020).
- [5] Oktay S, Sadıkoğlu S. The Gastronomic cultures' impact on the African cuisine. Journal of Ethnic Foods, 5(2), 140-146, (2018).
- [6] Şahin EÖ, Ağaoğlu B. Gastronomi Alanında Bulanık Mantık Kullanarak Etin Pişme Oranını Tahmin Eden Sistem Tasarımı, Journal of Tourism and Gastronomy Studies, 2020, Special Issue (4), 334-346, (2020).
- [7] Çavuşoğlu M. Gastronomi turizmi ve Kıbrıs mutfak kültürü üzerine bir araştırma. N. Avcı ve Ö. Kürşat (Ed.), I. Uluslararası IV. Ulusal Eğridir Turizm Sempozyumu Bildiriler Kitabı (ss. 527-538), (2011).
- [8] Birdir K, Akgöl Y. Gastronomi turizmi ve Türkiye'yi ziyaret eden yabancı turistlerin gastronomi deneyimlerinin değerlendirilmesi. İşletme ve İktisat Çalışmaları Dergisi, 3(2), 57-68, (2015).
- [9] Baysal, A., and Küçükaslan, N. (2009). Beslenme İlkeleri ve Menü Planlaması. Bursa: Ekin Yayınevi.
- [10] Çerkez M, Kızıldemir Ö. Yiyecek-İçecek İşletmelerinde Yapay Zekâ Kullanımı. Türk Turizm Araştırmaları Dergisi, 4(2), 1264-1278, (2020).
- [11] Ardatürk ÖÜAŞ. Tasarımcı Zihninin Bir Yansıması Olarak; "Yapay Zeka". Online Journal of Art and Design, 10(4), (2022).
- [12] Arslan K. Eğitimde Yapay Zekâ Uygulamaları. Batı Anadolu Eğitim Bilimleri Dergisi, 11(1), 71-80, (2020).
- [13] Kuşçu E. Çeviride Yapay Zekâ Uygulamaları. Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Dergisi (30), 45-58, (2015).
- [14] Kamble R, Shah D. Applications of Artificial Intelligence in Human Life. International Journal of Research, 6(6), 178-188, (2018).
- [15] Yağcı, C., Gökçe, İ., Bozüyük, T., ve Akar, G. (2005). Yapay Zeka Teknolojisinin Endüstrideki Uygulamaları. Bitirme Projesi, M. Ü, Teknik Bilimler MYO Temmuz, 27, 2016.
- [16] Choudhary S, Arba H, Patkar U. An Innovative Study on Artificial Intelligence and Robotics. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering, 4(3), 3292-3296, (2016).
- [17] Tutorials Point (2015). Artificial Intelligence. Haydarabad: Tutorials Point.
- [18] Ertürk FE, Yayan G. Bilim ve Sanatı Birleştiren İki Usta. Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 1(1), 453-464, (2012).

- [19] Yülek, M. (2018). 11. Kalkınma Planı ve Türkiye'nin robotları. [Online] <https://www.dunya.com/kose-yazisi/11-kalkinma-plani-ve-turkiyenin-robotlari/401624#>> [Erişim Tarihi: 15.03.2022]
- [20] Aydın, Ş. E. (2017). Yapay Zekâ Teknolojisi (Yapay Zekaların Dünü Bugünü Yarını). Adana
- [21] Dwivedi YK, Hughes L, Ismagilova E, Aarts G, Coombs C, Crick T, Eirug A. Artificial intelligence (AI): multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and Policy. *International Journal of Information Management*, 101-994, (2019).
- [22] Ergün ÖÖ, Öztürk B. Türk mutfağı için ontoloji tabanlı semantik gösterim. In 26th IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference, SIU 2018 (pp. 1-4), (2018).
- [23] Çuhadar M. Türkiye'ye yönelik dış turizm talebinin MLP, RBF ve TDNN yapay sinir ağı mimarileri ile modellenmesi ve tahmini: karşılaştırmalı bir analiz. *Yaşar Üniversitesi E-Dergisi*, 8(31), 5274-5295, (2013).
- [24] Çifçi, O. (2019). Türkiyedeki gastronomi ve mutfak sanatları eğitimi alan öğrencilerin profesyonel mutfak yeterliliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [25] Ignatov E, Smith S. Segmenting Canadian culinary tourists. *Current issues in tourism*, 9(3), 235, (2006).
- [26] Santich B. The Study of Gastronomy and Its Relevance to Hospitality Education and Training, *International Journal of Hospitality Management*, 23, 15-24, (2004).
- [27] Sugiura Y, Sakamoto D, Withana A, Inami M, Igarashi T. Cooking with robots: designing a household system working in open environments. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 2427-2430), (2010).
- [28] Varol, A. (2000). Robotik. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.
- [29] Master chef, <https://moley.com/>, [Erişim Tarihi: 11.10.2022].
- [30] Samsung Newsroom (2019), Get a Glimpse of the Next-generation Innovations on Display at Samsung's Technology Showcase, <https://news.samsung.com/global/get-a-glimpse-of-the-next-generation-innovations-on-display-at-samsungs-technology-showcase>, [Erişim Tarihi: 21.07.2022]
- [31] Ayyıldız AY, Eroğlu E. Restoranlarda Kullanılan Akıllı Teknolojiler ve Robot Restoranlar Hakkında Tripadvisor'da Yapılan Yorumların Değerlendirilmesi (Evaluation of Tripadvisor). *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, 9(2), 1102-1122, (2021).
- [32] FAH THAI (2016), Robot Chefs, <http://fahthaimag.com/ausca-robot-chefs-rollout-singapore/>, [Erişim Tarihi: 04.08.2022].
- [33] Oğan, Y. (2021). Gastronomi Araştırmaları. Çizgi Kitabevi Yayınları (e-kitap).
- [34] Yılmaz, G. (2020). Turizm-Gastronomi Turizmi Ve Gastronomik Seyahatler, Detay Yayıncılık.
- [35] Chen X, Zhu Y, Zhou H, Diao L, Wang D. ChineseFoodNet: A large-scale image dataset for chinese food recognition. *arXiv preprint arXiv:1705.02743*, (2017).
- [36] Razali MN, Moug EG, Yahya F, Hou CJ, Hanapi R, Mohamed R, Hashem IAT. Indigenous food recognition model based on various convolutional neural network architectures for gastronomic tourism business analytics. *Information*, 12(8), 322, (2021).
- [37] Jiang S, Min W, Liu L, Luo Z. Multi-scale multi-view deep feature aggregation for food recognition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 29, 265-276, (2019).

- [38] Khan R, Kumar S, Dhingra N, Bhati N. The use of different image recognition techniques in food safety: a study. *Journal of Food Quality*, (2021).
- [39] Chen J, Zhu B, Ngo CW, Chua TS, Jiang YG. A study of multi-task and region-wise deep learning for food ingredient recognition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 1514-1526, (2020).
- [40] Min W, et al. Large scale visual food recognition. *arXiv preprint arXiv:2103.16107*, (2021).
- [41] Kumar Dey S, Akter L, Saha D, Akter M, Rahman M. DeshiFoodBD: Development of a Bangladeshi Traditional Food Image Dataset and Recognition Model Using. In *Machine Intelligence and Data Science Applications*, Springer, Singapore, (pp. 639-648), (2022).
- [42] Shifat SM, Parthib T, Pyaasa ST, Chaity NM, Kumar N, Morol M. A Real-time Junk Food Recognition System based on Machine Learning. *arXiv preprint arXiv:2203.11836*, (2022).
- [43] CALORIE MAMA (2017), Instant Food Recognition, <https://www.caloriemama.ai/>, [Erişim Tarihi: 15.08.2022].
- [44] <https://www.yummly.com/>, [Erişim Tarihi: 26.09.2022]
- [45] LogMeal (2022), Artificial Intelligence and Deep Learning Solutions for Food Recognition, <https://www.logmeal.es/>, [Erişim Tarihi: 14.09.2022]
- [46] Tellspec (2015), Empowering a Healthier World with Real-Time AI-Analysis Using Portable Low-Cost Sensors, <https://tellspec.com/>, [Erişim Tarihi: 02.10.2022]
- [47] Pouladzadeh P, Kuhad P, Peddi SVB, Yassine A, Shirmohammadi S. Mobile cloud based food calorie measurement. In *2014 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW)* (pp. 1-6). IEEE, (2014, July).
- [48] Tanno R, Ege T, Yanai K. AR DeepCalorieCam V2: Food calorie estimation with cnn and ar-based actual size estimation. In *Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology* (pp. 1-2), (2018).
- [49] Ege T, Yanai K. Multi-task learning of dish detection and calorie estimation. In *Proceedings of the Joint Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities and Multimedia Assisted Dietary Management* (pp. 53-58), (2018).
- [50] Ege T, Yanai K. Image-based food calorie estimation using recipe information. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 101(5), 1333-1341, (2018).
- [51] Naritomi S, Yanai K. CalorieCaptorGlass: Food calorie estimation based on actual size using hololens and deep learning. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)* (pp. 818-819). IEEE, (2020).
- [52] Kumar RD, Julie EG, Robinson YH, Vimal S, Seo S. Recognition of food type and calorie estimation using neural network. *The Journal of Supercomputing*, 77(8), 8172-8193, (2021).
- [53] Shimoda W, Yanai K. CNN-based food image segmentation without pixel-wise annotation. In *International Conference on Image Analysis and Processing*, Springer, Cham, (pp. 449-457), (2015, September).
- [54] Chokr M, Elbassuoni S. Calories prediction from food images. In *Twenty-Ninth IAAI Conference*, (2017, February).
- [55] Ege T, Ando Y, Tanno R, Shimoda W, Yanai K. Image-based estimation of real food size for accurate food calorie estimation. In *2019 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR)* (pp. 274-279). IEEE, (2019, March).

- [56] Turmchokkasam S, Chamnongthai K. The design and implementation of an ingredient-based food calorie estimation system using nutrition knowledge and fusion of brightness and heat information. *IEEE Access*, 6, 46863-46876, (2018).
- [57] Hu H, Zhang Q, Chen Y. NIRSCAM: A Mobile Near-Infrared Sensing System for Food Calorie Estimation. *IEEE Internet of Things Journal*, (2022).
- [58] Zengin B, Uyar H, Erkol G. Gastronomi turizmi üzerine kavramsal bir inceleme. *Ulusal Turizm Kongresi*, 1, 16, (2015).
- [59] Pai PF, Hung KC, Lin KP. Tourism demand forecasting using novel hybrid system. *Expert Systems with applications*, 41(8), 3691-3702, (2014).
- [60] Law R, Li G, Fong DKC, Han X. Tourism demand forecasting: A deep learning approach. *Annals of tourism research*, 75, 410-423, (2019).
- [61] Li X, Pan B, Law R, Huang X. Forecasting tourism demand with composite search index. *Tourism management*, 59, 57-66, (2017).
- [62] Chen KY, Wang CH. Support vector regression with genetic algorithms in forecasting tourism demand. *Tourism management*, 28(1), 215-226, (2007).



Design, Control and Automation of MHPP - An Experimental Setup

Fatih Mehmet ULU¹, Hüseyin ALTINKAYA^{2*}

¹Karabük University, TOBB Vocational School, Department of Electrical, 78050, KARABÜK

²Karabük University, Faculty of Engineering, Department of Electrical-Electronics Engineering, 78050, KARABÜK

Article Info

Research article
Received: 24.07.2022
Revision: 26.10.2022
Accepted: 19.11.2022

Keywords

PID Controller
ANN
Frequency Control
Voltage Control
PLC

Abstract

In this paper the design, manufacturing and automation of a micro hydroelectric power plant (MHPP) prototype has been carried out. The experimental setup consists of three 1 kW synchronous generators (SGs) working in synchronization with each other and with the grid, three Pelton turbines with a single nozzle manufactured using a 3D printer, a water tank with a capacity of approximately one ton, a 5.5 kW centrifugal pump providing appropriate flow and head conditions and an 11 kW driver controlling the speed of this pump. The mechanical and electrical structure of the system and its working scenario are designed to be the closest to a real MHPP. S7-1200 PLC (Programmable Logic Controller) is used in order to control the voltage and frequency values of synchronous generators according to the load as well as for other control processes. It is possible to control and monitor the whole system through SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) screens. In this study, conventional PID control method and ANN (Artificial Neural Network) based PID are preferred for frequency and voltage control. The results have been evaluated by obtaining frequency-time, voltage-time, graphs of synchronous generators under different load conditions. Obtained results show that ANN-PID is faster than traditional PID and gives better results in terms of parameters such as settling time and overshoot.

1. INTRODUCTION

There are many equipment and intermediate stages in the production processes of HPPs. HPPs are complex and non-linear systems consisting of many mechanical and electrical-electronic equipment. There are many studies conducted on different aspects of HPPs. Since the aim of this study is to present the design and control of a prototype of a micro HPP, a summary of the work done especially on frequency and voltage control, has been given.

Micro Hydroelectric Power Plants with synchronous generators were stated to be advantageous in integration into the grid as compared to other renewable technologies. The PID-PI controllers were analyzed using the MATLAB / Simulink software package on the control of the speed regulator, which is one of the main components regulating the water flow of Micro Hydroelectric Power Plants. The synchronous generator voltage and rotor speed were compared using both control techniques under temporary and steady state conditions in their models, and they concluded that the PI control reached normal values faster than the PID control [1]. For a micro hydroelectric power plants, frequency control and voltage control were performed using Fuzzy Logic Controller and PI and PID controllers, respectively. The system was tested with active and reactive loads at different stages. As a result, the study also revealed the problems experienced in the correlation of experimental work with reality [2]. A model was created by predicting that using small powerful turbines with different powers instead of one large powerful turbine in MHPP would provide the highest benefit in variable water potential as a result of seasonal effects. In this model, the integration of the turbines into the grid was designed with a PLC using Fuzzy Logic algorithm. SCADA

system was also used for remote monitoring and data recording of the system. In this model design, the system installed with three turbines of different powers were calculated to provide an increase in efficiency enough to compensate for the investment cost of the system with a single turbine that would occur in 5-5.5 years [3].

Although the parameter selection of PID controller remains challenging, it plays an important role in regulating quality and ensuring system stability. Using system decoupling in Jordan normal form with a state matrix, a state space model of hydraulic turbine regulating system (HTRS) with a surge tank was presented along with a formula derived for dimensionless rotating speed of turbine. The PID controller parameters were selected based on regulating quality parameters (RQP). Time-domain simulations as well as a comparative analysis of direct solving method (DSM) were performed based on a practical HPP. Same results were yielded by both methods; in providing a full RQP domain, DSM was found to be considerably efficient. The proposed DSM suggested the use of only state parameters in the selection of PID controller parameters. Considering varying conditions in the operation of hydro power plants, DSM was found to be effective in tuning purposes [4]. Another study presented a proportional integral derivative (PID) design for a hydro dominating energy system model, which was based on load frequency control (LFC) scheme. The designed controller was implemented in area-1 for at least 1% load disturbance and the values were compared with the values of classical PID. The performance of the controller was evaluated under various system conditions, thus, considering the non-linearity as well as the application results [5]. Based on fuzzy proportional derivative (PD) method, a new method was presented for LFC. The PD gains were tuned automatically using fuzzy rules to keep frequency at some nominal value under frequency variations. In order to control the frequency of mini hydropower system, the proposed controller was used. The performance of the system using the control scheme was evaluated by simulation performed under frequency variations. The results showed high performance frequency control when compared with conventional PD controller having fixed-gain [6]. In a paper, the design, modeling and experimental analysis of a hydropower plant with Automatic Generation Control (AGC) was presented. Adaptive Neuro Fuzzy Inference system (ANFIS) was used in the model. The aim was to reduce the frequency deviations occurring during power generation and to control the parameter selection for effective control of power in the HPP. Matlab was used in order to investigate the FLC, conventional PID and ANFIS controllers. The results showed that the ANFIS controller has a better performance rate as compared to conventional PID and FLC [7]. The study was conducted on non-linear model predictive controller (MPC) in order to control the variable speed hydropower (VSHP) plants. According to the simulation results, the proposed MPC was able to reduce water hammering experienced in the penstock pipes, damp the power oscillations found in the grid and improve turbine flow, power and head estimation. Therefore, VSHP may provide some considerable amount of FFR (fast frequency reserves) to the grid [8].

Many studies have been conducted on AVRs, which control the output voltage of synchronous generators. These are control methods performed together with various algorithms such as traditional PID implementations [9-12], cuckoo search algorithm [13], particle swarm optimization [14], coyote optimization algorithm [15], whale optimization algorithm [16,17], nonlinear robust coordinated [18], PSS and H_{∞} optimization [19] and kidney-inspired algorithm [20].

In addition to traditional PI and PID applications for the control of load frequencies of synchronous generators and power systems, control methods used with different algorithms, artificial intelligence and optimization techniques are also seen. Full order sliding mode [21], fuzzy proportional–integral [22, 23], passivity-based control [24], stability boundary locus approach [25], ant colony optimization [26], bat algorithm [27] and fuzzy sliding mode controller [28] are also among the techniques used. There are such studies [29, 30] in which traditional PID applications are performed and frequency control of other studies is reviewed [31,32].

In this study, micro HPP prototype experimental setup was designed and manufactured. Traditional PID and ANN based PID were used for voltage and frequency control. Voltage and frequency control was carried out simultaneously in the experimental environment.

2. GENERAL STRUCTURE OF THE MHPP PROTOTYPE

In this section, the general working principle of the closed-loop MHPP prototype, which can be operated in a laboratory environment with the working principle as close as possible to the working conditions and scenario of a real micro/mini/small HPP, and the equipment and their functions used for the manufacturing will be focused on.

In the prototype, the water absorbed from the water tank with a capacity of approximately one ton is brought to the proportional valves by using a horizontal shaft, four-stage pump driven by an asynchronous motor and a piping system.

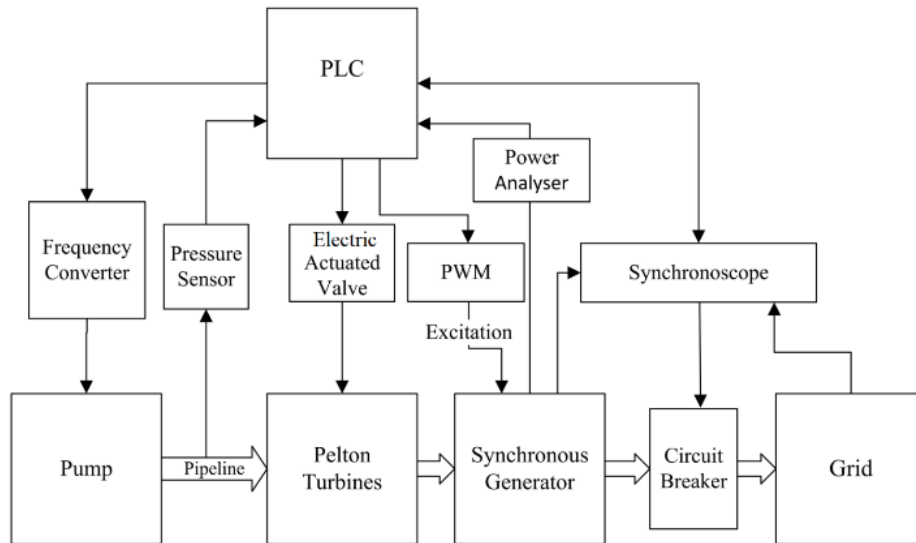


Figure 1. Block diagram of prototype.

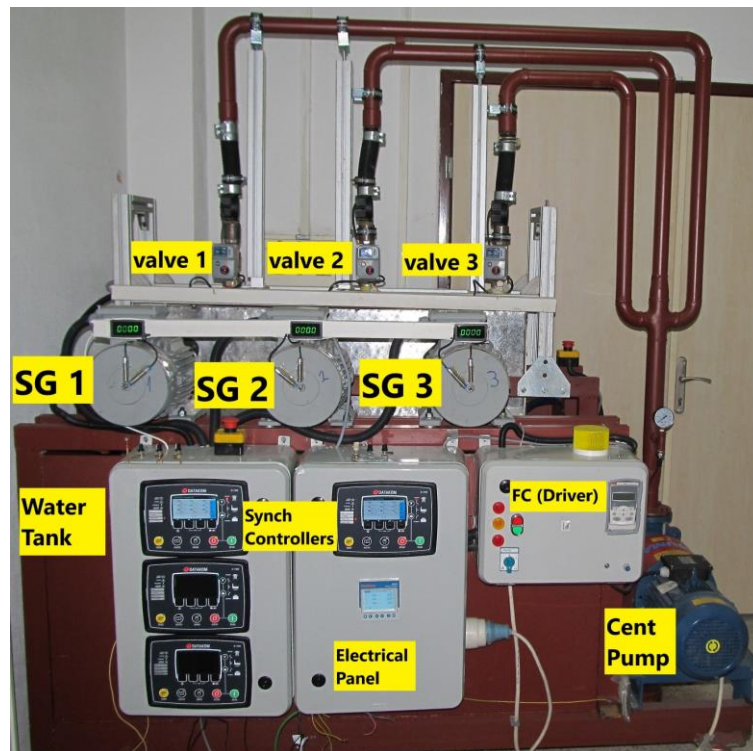


Figure 2. General view of the experimental setup.

The water pressure in the piping system is measured with an analog sensor. Centrifugal pump motor provides stabilization of water pressure in the system by means of frequency converter (driver) controlled by PLC. With proportional valves, the adjusted amount of water from the nozzle is hit to the Pelton turbines with an increased speed. The water loses its energy in the turbine and returns to the tank by free fall. The energy converted into rotational motion in the turbine generates electrical energy by being proportionally excited with the DC PWM clipper coupled to the turbine shaft with the SGs (Synchronous Generators). Frequency control of SGs is performed by controlling proportional valves with PLC. Integration of the electrical energy with the grid is performed with synchroscope devices. During all these processes, PLC monitors and controls the system with sensors and network analyzers. In addition, events can be monitored instantly with PLC-SCADA software. The block diagram of the system and general view of the experimental setup are given in Figures 1 and 2.

3. CONTROL SYSTEM

3.1. Frequency Control

The frequency control in the experimental setup is based on the control of the proportional valve connected to the analog outputs of the PLC, which processes the 0-10V signal received at the analog input comprising the analog frequency data from the network analyzers. Before synchronization, the frequency value of the generator is equalized to the network frequency value, i.e. 50 Hz. The flow chart of this cycle is given in Figure 3.

It is important to make the above-mentioned fine adjustment until the synchronization occurs and this loop is terminated once the synchronization process ends. Adjusting the proportional valve is essential for active power supply to the network.

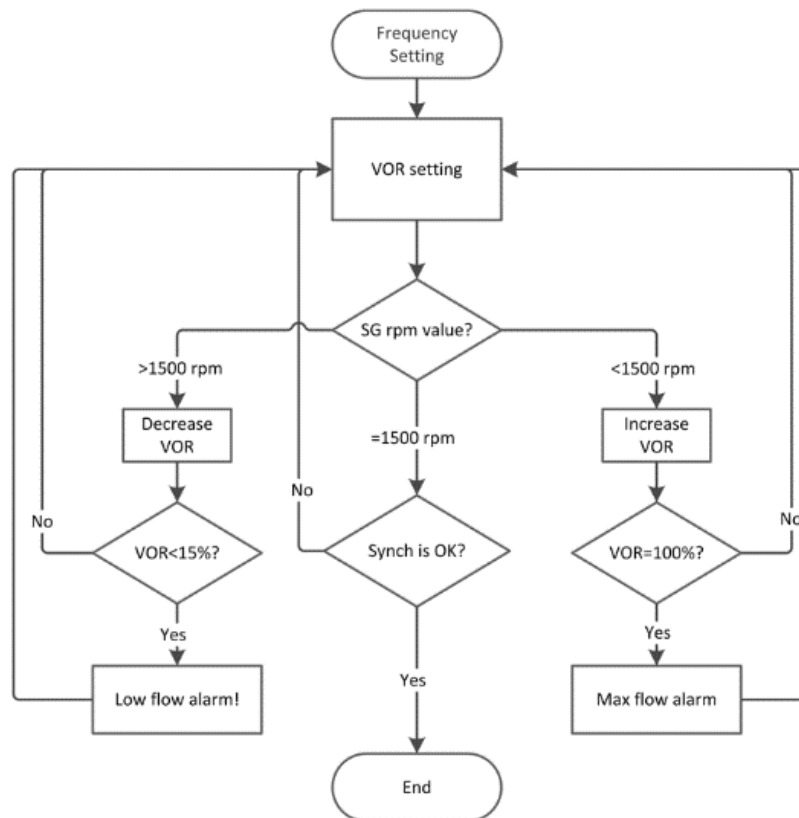


Figure 3. Frequency control flow chart.

3.2. Voltage Control

Adjustment of the voltage produced by the generator is performed by connecting a 0-5 V DC analog control input of the DC voltage clipper circuit placed for each generator at the power supply output, to the analog outputs of the PLC, and changing the excitation voltage. Before synchronization, the voltage value produced by the generator is equalized to the mains voltage.

In order to equalize the voltage generated before synchronization, processes shown in the flow diagram in Figure 4 are performed. It is important to make this fine adjustment until the synchronization occurs. This loop is terminated after the synchronization process.

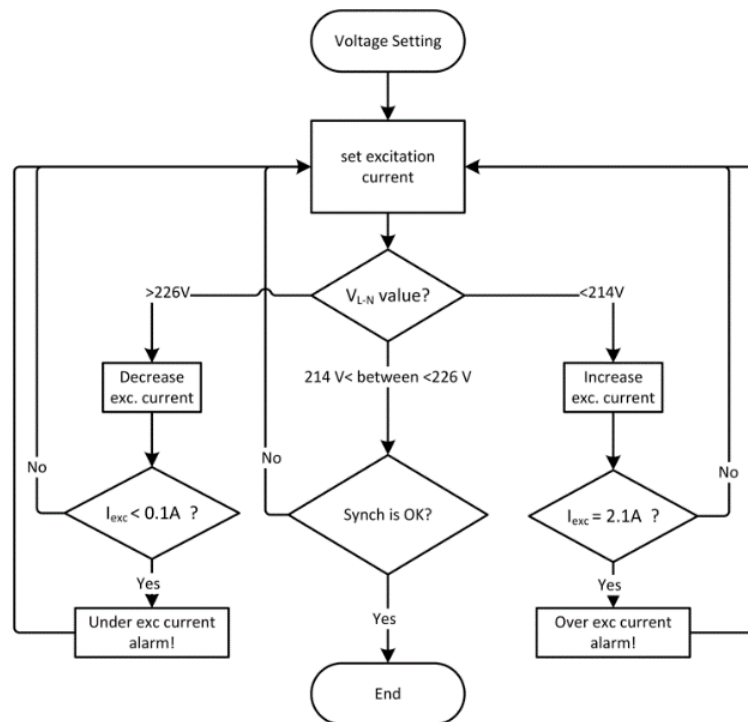


Figure 4. Voltage control flowchart.

3.3. PID Function

Adjustment of the frequency and voltage values of the SGs according to the load is provided by using the PID_Compact function in the PLC software. The PID algorithm works according to the equation given below:

$$y = K_p \left[(b \cdot w - x) + \frac{1}{T_I \cdot s} (w - x) + \frac{T_D \cdot s}{a \cdot T_D \cdot s + 1} (c \cdot w - x) \right] \quad (1)$$

Where y is output value of the PID algorithm, K_p is proportional gain, s is Laplace operator, b is proportional action weighting, w is set point, x is process value, T_I is integral action time, T_D is derivative action time, a is derivative delay coefficient, c is derivative action weighting [33].

PID block diagrams related to frequency (rpm) and voltage set points in the system are shown in Figure 5 and Figure 6, respectively.

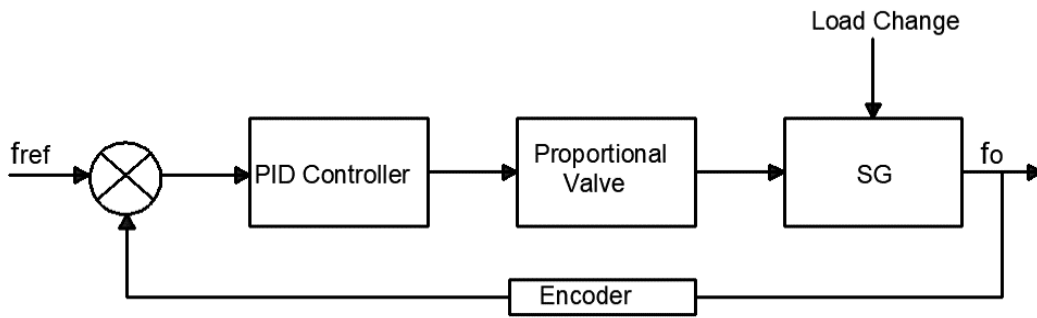


Figure 5. PID block diagram of frequency control.

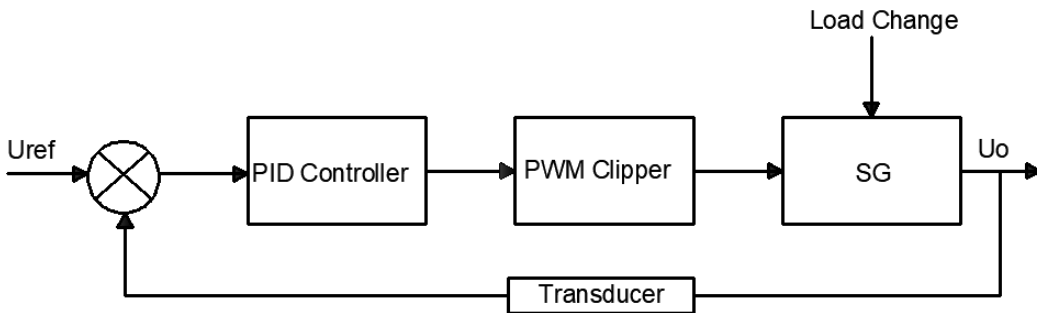


Figure 6. PID block diagram of voltage control.

The values of the PID parameters obtained after the Pre-tuning and Fine-tuning processes of the PID_Compact function run in automatic mode in the experiments are shown in Figure 7 and Figure 8 for frequency and voltage, respectively.

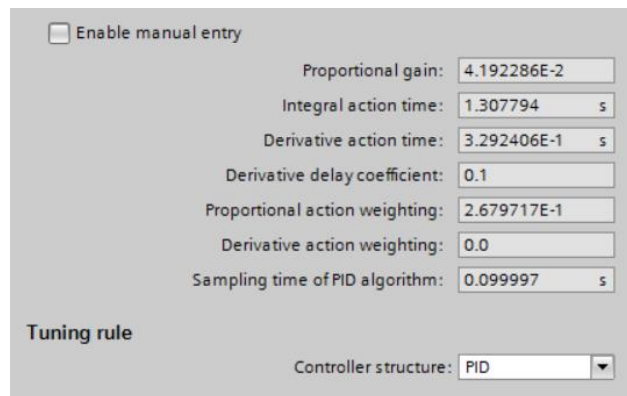


Figure 7. Frequency PID_compact values.

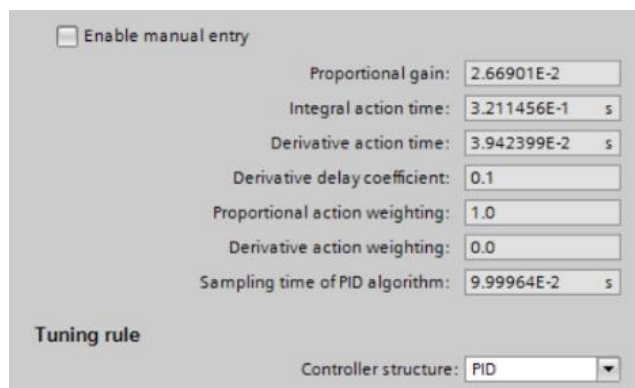


Figure 8. Voltage PID_compact values.

4. ANN-PID CONTROLLER

In this chapter, an ANN-based self-tuning (adaptive) PID controller is presented for frequency and voltage control. PID gains are tuned online using NN based algorithm. The robustness of control system is carried out by continuously tuning of PID parameters (K_p , K_i and K_d). PID controller tuning depends on the adjustment of its gains. As well known, PID controller equation in time domain can be expressed in equation 2.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

where $e(t)$ is error value, $r(t)$ is set point, $y(t)$ is output value, $u(t)$ is control variable.

A block diagram of self-tuned PID control with artificial neural network is shown in Fig. 9. Error, reference and output are fed into PID controller. ANN-based self-tuning algorithm adjust K_p , K_i and K_d values as system parameters change using ANN based PID, the PID gains are constantly updated.

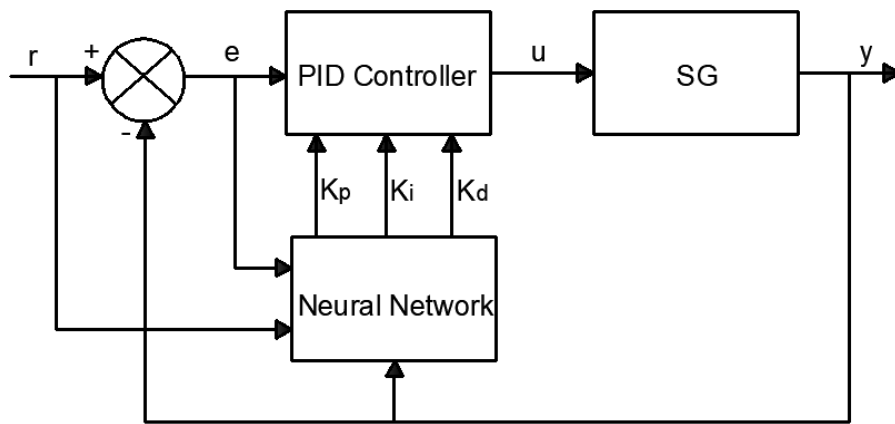


Figure 9. ANN-PID controller.

Data obtained from multiple experiments with various load changes were recorded in PLC/SCADA software (TIA portal interface). These data were used for training and testing of ANN. ANN was created in Matlab interface. Load variation (ΔP), error (e_u/e_f), reference value (ref) and settling time (t_s) input parameters; K_p , K_i and K_d were chosen as output parameters. For learning rule, the feed-forward back-propagation method; as transfer function, tansig; for training function, LM were selected. Number of iterations was determined to be optimum 100.

From the ANNs established with varying architectures, the artificial neural network architecture that provided the best results and that had two hidden layers with 8 neurons in the first layer and 4 neurons in the second layer was used. In total, 1325 data were used for training and 255 data for the test. In Figures 10 and 11, architecture of the designed ANN and view in Matlab, respectively, are given.

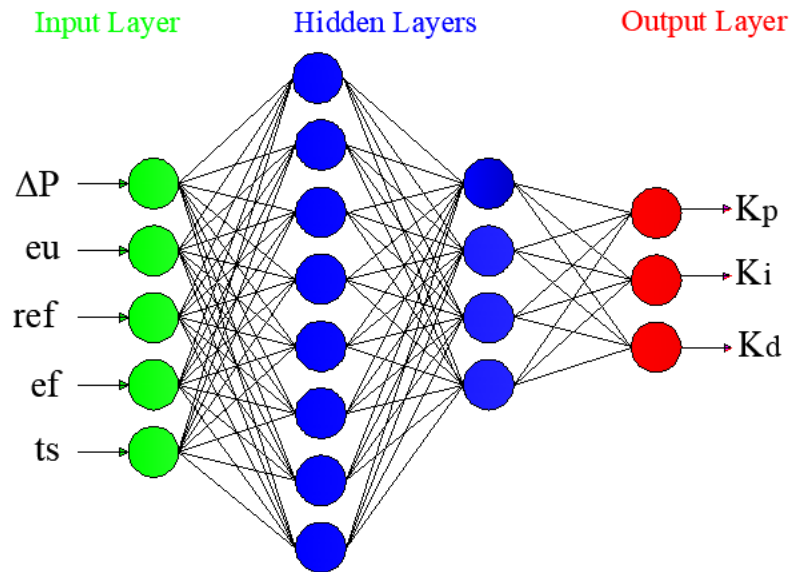


Figure 10. Architecture of the ANN.

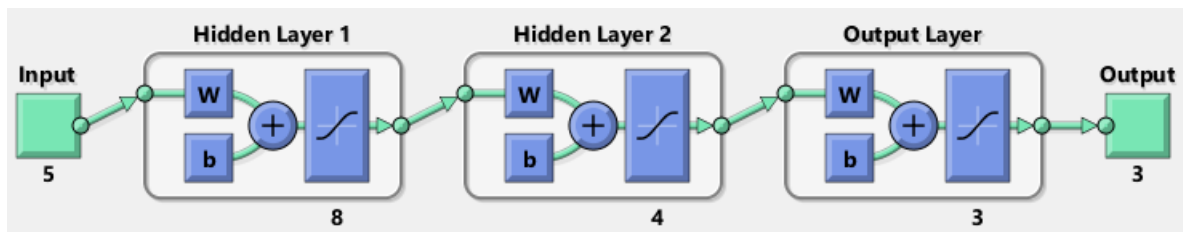


Figure 11. View of the ANN in Matlab.

In Section 5, characteristic graphs of SGs drawn with data from the field have been given.

5. EXPERIMENT RESULTS

The data obtained in the experiments performed with the established experimental setup are graphed. As a result of the experiments, the highest active power produced by the generators is measured to be 400 W. Although the line voltage value between phase-neutral is shown as 220 V in flow diagrams, ladder and SCADA screen displays, the set value of the voltage (L-N) is determined according to the network values at that instant since the network voltage value changes (by taking into account the synchronization with the grid) at the time of the experiments. Therefore, the test results and graphics were calculated and drawn accordingly.

The results of the transition from no load to 180 W load (0-45%) are given in Figures 12 and 13. In the experiment using conventional PID, the lowest voltage value was 228 V (overshoot is 7 V) and the lowest frequency value at the rate of 48.3 Hz (overshoot is 1.7 Hz). Voltage and frequency values were made to reach the set values in 18 seconds by the PID controller. In the experiment with ANN-PID, the lowest voltage value was 232 V (overshoot is 3 V), and the lowest frequency value at the rate of 49.6 Hz (overshoot is 0.4 Hz). Voltage value was made to reach the set values in 9 seconds, while frequency value in 6 seconds with the ANN-PID controller.

The test loads are switched on at $t=0$ point and in the pulse transition form (not linear increase).

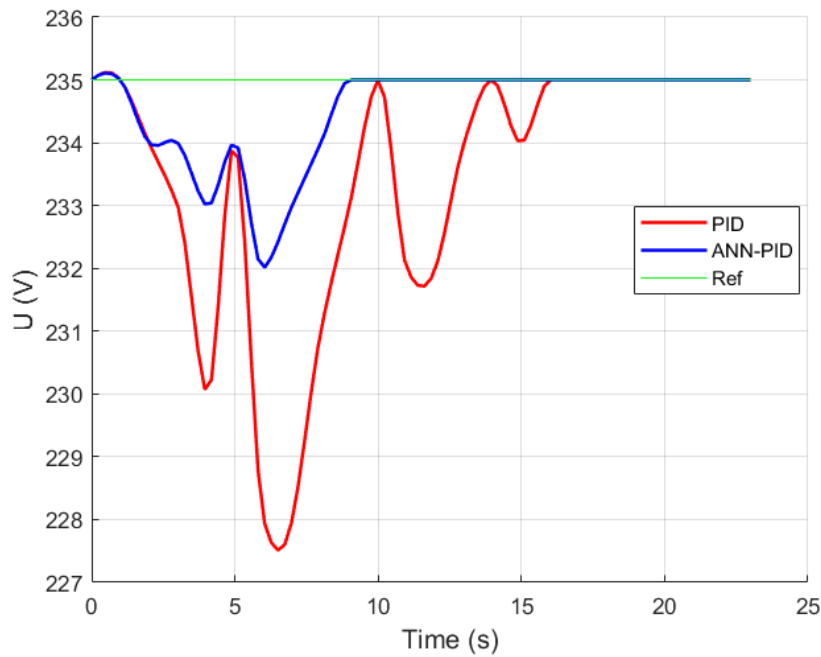


Figure 12. 0-180W U-t graph.

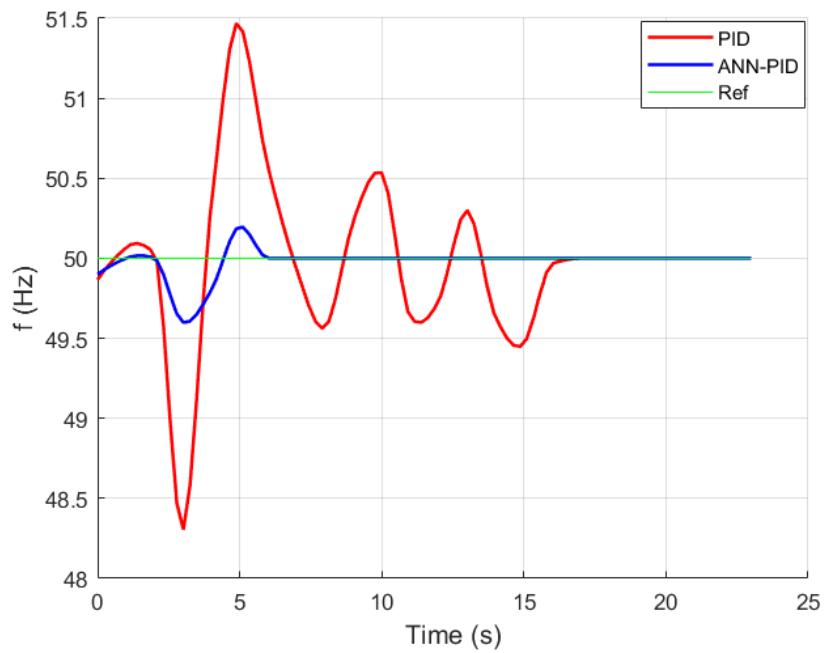


Figure 13. 0-180W f-t graph.

The graphs showing the transition of a single generator operating in local mode at a constant pressure of 8.6 bar from no load to 340 W (0-85%) load are given in Figures 14 and 15. The lowest voltage value in the experiment with conventional PID was observed to be 171 V (overshoot is 64V) and the frequency value was 38.9 Hz (overshoot is 11.1 Hz). Voltage and frequency values reached their set values in 18 and 22 seconds. In the experiment using ANN-PID, the lowest voltage value was 213 V (overshoot is 22 V), and the lowest frequency value at the rate of 48.2 Hz (overshoot is 1.8 Hz). Voltage and frequency values reached their set values in 14 seconds and 7 second respectively.

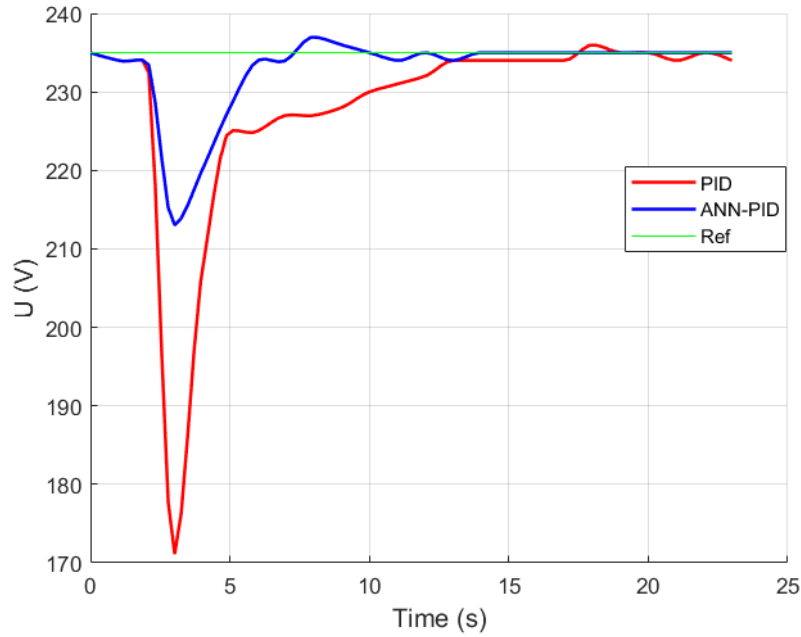


Figure 14. 0-340 W U-t graph

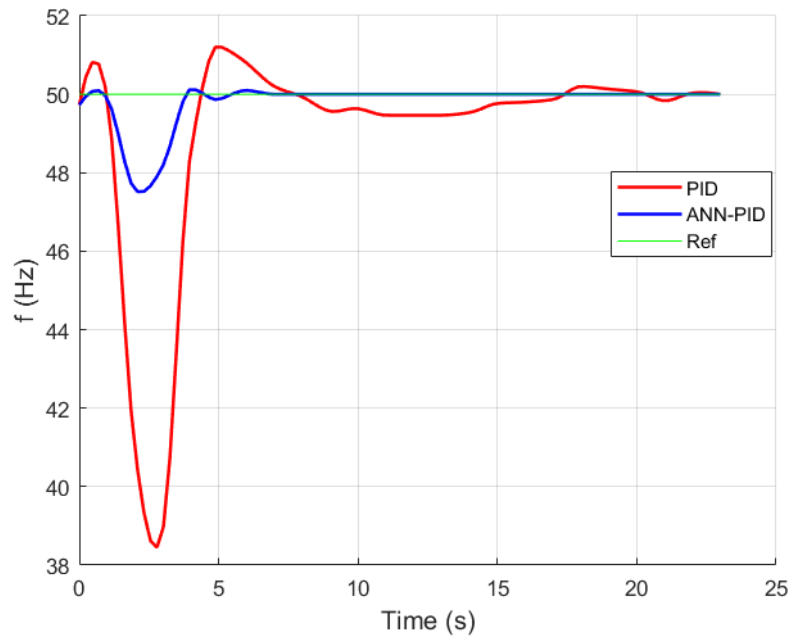


Figure 15. 0-340 W f-t graph

The graphs showing the transition of synchronized SGs at 8.6 bar constant pressure from 860 W load to 200 W load (72%-16%) are given in Figures 16 and 17. Using traditional PID, the highest and the lowest voltage values obtained in this experiment were 240 V and 224V (overshoots are 5V and 11V), thus, exceeded the frequency value at the rate of 72 Hz (overshoot is 22 Hz). The voltage value reached the set value in 21 seconds, whereas the frequency value reached the set value in 14 seconds. With ANN-PID, the highest and the lowest voltage values obtained in this experiment were 238V and 232V (overshoots are 3V and 3V), thus, exceeded the frequency value at the rate of 56.5 Hz (overshoot is 6.5 Hz). The voltage and frequency values reached the set value in 9 seconds.

The test loads are switched off at $t=0$ point and in the pulse transition form (not linear decrease).

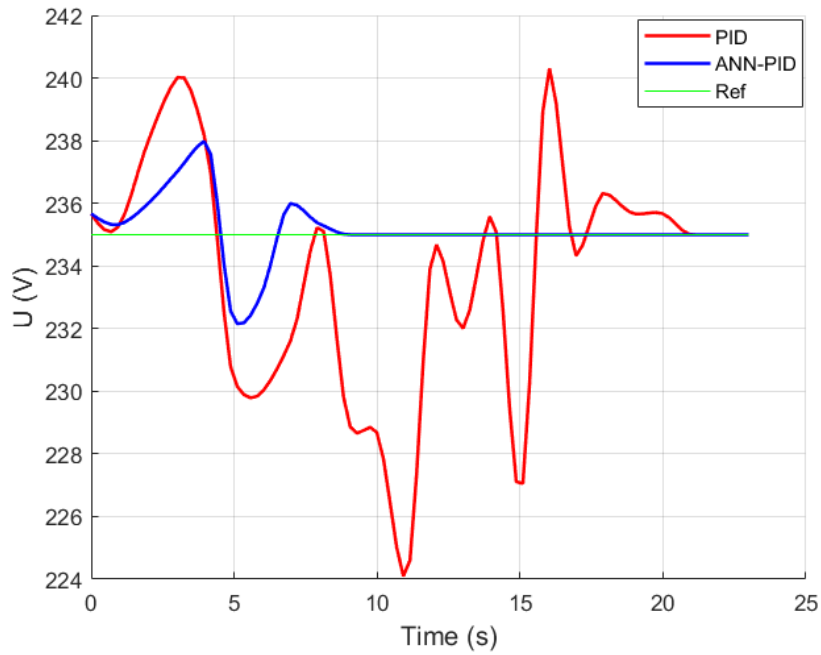


Figure 16. 860-200 W U-f graph.

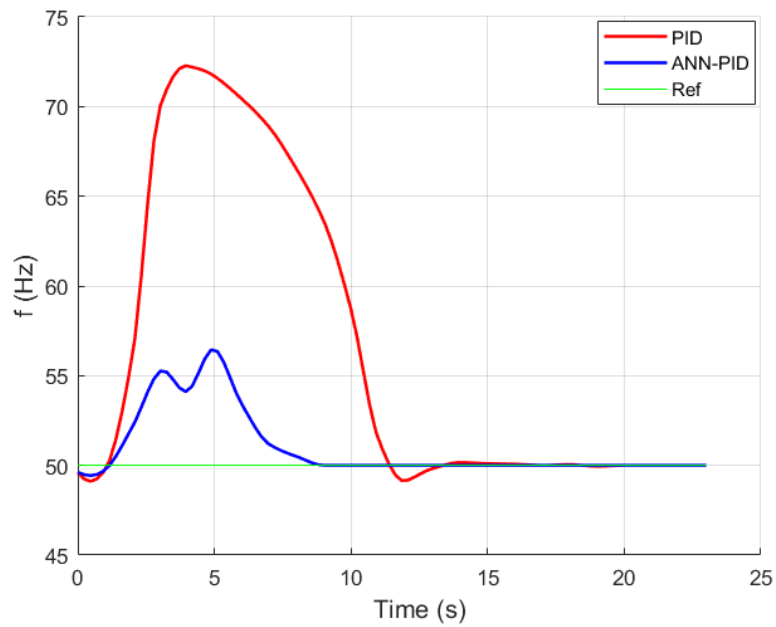


Figure 17. 860-200 W t-f graph.

The results obtained from traditional PID and ANN-PID in the experiments are given in Tables 1 and 2 for voltage and frequency control respectively.

Table 1. PID and ANN-PID comparison for voltage control

| Experiment | Settling Time (s) | | Overshoot (V) | |
|------------|-------------------|---------|---------------|----------|
| | PID | ANN-PID | PID | ANN-PID |
| 0-180W | 18 | 9 | 7 (3%) | 3 (1.3%) |
| 0-340W | 18 | 14 | 64 (27%) | 22 (9%) |
| 860-200W | 21 | 9 | 11 (4.7%) | 3 (1.3%) |

Table 2. PID and ANN-PID comparison for frequency control

| Experiment | Settling Time (s) | | Overshoot (Hz) | |
|------------|-------------------|---------|----------------|------------|
| | PID | ANN-PID | PID | ANN-PID |
| 0-180W | 18 | 6 | 1.7 (3.4%) | 0.4 (0.8%) |
| 0-340W | 22 | 7 | 11.1 (22.2%) | 1.8 (3.6%) |
| 860-200W | 14 | 9 | 22 (44%) | 6.5 (13%) |

6. CONCLUSIONS

In this article, a micro-level prototype of a HPP with three SG and Pelton turbines was established. The design, installation, control and automation of a non-linear system consisting of many mechanical and electrical equipment and subsystems were performed. Since three turbines could be operated at the same time with the experimental setup, different control modes were created for SGs such as synchronization of more than one SG among themselves and with the interconnected grid, as in a real MHPP. Automation of the system was also conducted with PLC and SCADA software. The voltage and frequency control of the system was performed under different loads. Conventional PID and ANN-PID control mode were selected for control. In normal operation, while the voltage and frequency are made to reach the set value simultaneously by the PIDs, the indirect or direct effect of these two parameters causes the voltage to reach the set value later than in the individual operation. Generally, only the frequency or voltage of the SGs is controlled in the papers. Theoretically, it is assumed that frequency and voltage do not affect each other, but in practice, when evaluated together with other parameters, they do. In this study, the voltage and frequency of a real system (MHPP) built as a prototype were controlled simultaneously under changing loads. It has been observed that ANN-PID gives much better results than traditional PID in terms of parameters such as settling time and overshoot. The results of the present study showed that ANN is an effective and reliable method for voltage and frequency control of SGs, which is a nonlinear and complex system. Although the settling time seems to be long in the experiments, it can be understood that these times are considerably shorter when the acceptable tolerances for voltage and frequency are taken into account.

In future studies, the results can be compared using different artificial intelligence techniques and algorithms for voltage and frequency control. The ANN algorithm can be further improved.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Coordinatorship of Research Projects of the Karabuk University. Project Number: KBÜ-BAP-16/1-YL-142.

REFERENCES

- [1] Waqas A, Waseem, A. (2017). PID vs PI Control of speed governor for synchronous generator based grid. *J. Fac. Eng. Technol*, 24(1), 53–62.
- [2] Özdemir MT. (2012). Active and reactive power control based on intelligent controller at micro hydro power plant. PhD. thesis, Fırat University.
- [3] Kurt H. (2013). Small-scale hydroelectric power plant turbine control using PLC with fuzzy logic algoritihm. MSc thesis, Fırat University.
- [4] Yu X, Yang X, Yu C, Zhang J, Tian Y. (2017). Direct approach to optimize PID controller parameters of hydropower plants. *Renew Energ* 2021;173, 342-350.
- [5] Panwar A, Sharma G, Nasiruddin I, Bansal RC. (2018). Frequency stabilization of hydro– power system using hybridbacteria foraging PSO with UPFC and HAE. *Electr Pow Syst Res* 2018;161, 74–85.
- [6] Khana MRB, Pasupuletia J, Jidina R. (2018). Load frequency control for mini hydropower system: A new approach based on self-tuning fuzzy proportional-derivative scheme. *Sustain Energy Techn.*, (30) 253–262.
- [7] Weldcherkos T., Salau AO, Ashagrie A. (2021). Modeling and design of an automatic generation control for hydropower plants using neuro-fuzzy controller. *Energy Rep*, (7), 6626–6637.
- [8] Reigstad TI, Uhlen K. (2021). Nonlinear model predictive control of variable speed hydropower for provision of fast frequency reserves. *Electr Pow Syst Res.*, (194), 107067.
- [9] Jarman R, Bryce P. (2007). Experimental investigation and modelling of the interaction between an AVR and ballast load frequency controller in a stand-alone micro-hydroelectric system. *Renew Energ*, (32) 1525–1543.
- [10] Sahib MA. (2015). A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Eng Sci Technol*, (18) 194-206.
- [11] Sreedivya KM, Jeyanthi PA, Devaraj D. (2019). An effective AVR-PSS design for electromechanical oscillations damping in power system. In: 2019 IEEE International Conference on Clean Energy and Energy Efficient Electronics Circuit for Sustainable Development (INCCES) doi:10.1109/INCCES47820.2019.9167703..
- [12] Nirgudkar SS, Sarode UB. (2015). Implementation of digital automatic voltage regulator (AVR) for small laboratory alternator. In: 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015) 338-341.
- [13] Sikander A, Thakur P. (2020). A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system. *Isa T*, (100) 235–243.
- [14] Zamani M, Ghartemani, MK, Sadati N, Parniani M. (2015). Design of a fractional order PID controller for an AVR using particle swarm optimization. *Control Eng Pract* 2009;(17) 1380–1387.Sahib MA. A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Eng Sci Technol*, (18) 194-206.
- [15] Moschos I, Parisses C. (2015). A novel optimal $PI^{\lambda}DND^2N^2$ controller using coyote optimization algorithm for an AVR system. *Eng Sci Technol* 2022; Article in press Sahib MA. A novel optimal PID plus second order derivative controller for AVR system. *Eng Sci Technol*, (18) 194-206.
- [16] Mosaad AA, Attia MA, Abdelaziz AY. (2019). Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system” *Ain Shams Eng J*, (10) 755–767.

- [17] Ozgenc B, Ayas MS, Altas İH. (2020). A hybrid optimization approach to design optimally tuned PID controller for an AVR System. In: 2020 International Congress on Human Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA) doi:10.1109/HORA49412.2020.9152898
- [18] Verrelli CM, Marino R, Tomei P, Damm G. (2021). Nonlinear robust coordinated PSS-AVR control for a synchronous generator connected to an infinite bus. IEEE Transactions on Automatic Control, doi:10.1109/TAC.2021.3062174.
- [19] Mešanović, A, Münz U, Szabo A, Mangold M, Bamberger J, Metzger M, Heyde C, Krebs R, Findeisen R. (2020). Structured controller parameter tuning for power systems. Control Eng Pract, (101) 104490.
- [20] Ekinci S., Demirören A., Zeynelgil H.L., Kaya S. (2019). Design of PID Controller for Automatic Voltage Regulator System through Kidney-inspired Algorithm. GU J Sci, Part C, 7(2): 383-398.
- [21] Guo J. (2019). Application of full order sliding mode control based on different areas power system with load frequency control. Isa T, (92) 23–34.
- [22] Salhi I, Doubabi S, Essounbouli N, Hamzaoui A. (2014). Frequency regulation for large load variations on micro hydro power plants with real-time implementation. Electrical Power and Energy Systems, (60) 6–13.
- [23] Kamble, SV, Akolkar SM. (2017). Load frequency control of micro hydro power plant using fuzzy logic controller. In: 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI) doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392021.
- [24] González WG, Montoya OD, Garces A. (2020). Modeling and control of a small hydro-power plant for a DC microgrid. Electr Pow Syst Res, (180) 106104.
- [25] Sharma J, Hote YV, Prasad R. (2019). PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay. Control Eng Pract, (89) 154–168.
- [26] Singh O, Verma A. (2020). Frequency Control for stand-alone hydro power plants using antcolony optimization. In: 2020 IEEE International Conference on Advent Trends in Multidisciplinary Research and Innovation (ICATMRI) doi: 10.1109/ICATMRI51801.2020.9398417.
- [27] Yuniahastuti IT, Anshori I, Robandi I. (2026). Load frequency control (LFC) of micro-hydro power plant with capacitive energy storage (CES) using bat algorithm (BA). In: 2016 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (ISEMANTIC) doi: 10.1109/ISEMANTIC.2016.7873828.
- [28] Kardile AH, Mule SM, Nagarale RM, Shiurkar UD. (2026). Small Hydro Power Plant control based on Fuzzy Sliding Mode Controller using Particle Swarm Optimization algorithm. In: 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT) doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754888.
- [29] Oliveira EJ, Honório LM, Anzai AH, Oliveira LW, Costa EB.(2015). Optimal transient droop compensator and PID tuning for load frequency control in hydro power systems. Electrical Power and Energy Systems, (68) 345–355.
- [30] Guo W, Yang J. (2018). Stability performance for primary frequency regulation of hydro- turbine governing system with surge tank". Appl Math Model, (54) 446–466
- [31] Singh RJ, Kumar BA, Shruthi D, Panda R, Raj CT. (2018). Review and experimental illustrations of electronic load controller used in standalone micro-hydro generating plants. Eng Sci Technol, (21), 886–900.

- [32] Sami I, Ullah N., Muyeen SM, Techato K, Chowdhury S, Ro AJS. (2020). Control methods for standalone and grid connected micro-hydro power plants with synthetic inertia frequency support: A comprehensive review. IEEE Access 2020; Volume:8 doi: 10.1109/ACCESS.2020.3026492.
- [33] https://support.industry.siemens.com/cs/document/100746401/pid-control-with-pid_compact-for-simatic-s7-1200-s7-1500?dti=0&lc=en-WW



Lung Cancer Detection by Hybrid Learning Method Applying SMOTE Technique

Alihan SUIÇMEZ^{1*} Çağrı SUIÇMEZ² Cengiz TEPE³

¹Kastamonu University Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, 37150, Merkez/KASTAMONU

²Gazi University Faculty of Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering, 06560, Yenimahalle/ANKARA

³Ondokuz Mayıs University Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics Engineering, 55200, Atakum/SAMSUN

Article Info

Research article

Received: 9.11.2022

Revision: 28.11.2022

Accepted: 28.11.2022

Keywords

Lung Cancer Detection

Deep Learning

Hybrid Learning

Classification

Abstract

Lung cancer is a very deadly disease. However, early diagnosis and detection is an essential factor in overcoming this deadly disease. Tumors formed in this disease's initial stage are divided into benign and malignant. These can be visualized using a computed tomography (CT) scan. Thanks to machine learning and deep learning, cancer stages can be detected using these images. In our study, the best and most promising results in the literature were obtained by using a hybrid learning architecture. The data mining techniques we use in obtaining these results also play a significant role. The best accuracy result we obtained belongs to the CNN+GBC hybrid algorithm, which we recommend with 99.71%.

1. INTRODUCTION

Lung cancer is the most dangerous type of cancer among cancer types when its incidence and mortality rates are considered in humans [1]. According to the American Cancer Society, lung cancer is the second most common type of cancer in both sexes, after prostate and breast cancer [2]. Each year, human deaths from lung cancer are more than colon, breast, and prostate cancers combined [2]. According to The International Agency for Research on Cancer (IARC) data, the number of deaths from this disease reached 1.8 million people in 2020, which equals 18.0% of total cancer deaths compared to total cancer types [3]. Lung cancer is caused by the growth of tumors, with cells growing out of control. It makes it difficult for the patient to breathe. In lung cancer, the small cell type is called adenocarcin, squamous cell, while the large cell carcinoma is called [4, 5]. It has been observed that 80% of people who have died from lung cancer have used cigarettes and alcohol [6].

In lung cancer, as in every other disease, early detection and detection saves people from death. When researchers analyzed the statistics of the 8th Tumor, Node, Metastasis (TNM) staging system, it shows that early detection and detection reduces survival rates from as high as 92% for very early stage (T1a) lung cancer to 38-47% at T4 stage [7]. There are scanning methods such as computed tomography (CT), magnetic resonance imaging (MRI) and chest x-ray in diagnosing and detecting the disease.

With the advancement of imaging technologies, the use of devices that emit radiation at lower doses, thanks to scans such as low-dose computed tomography (LDCT), also results in a much higher number of people to be examined than those who are actually sick. In this case, it cannot meet the increasing demand since it significantly increases the workload on radiologists in detecting and diagnosing the disease of people with cancer. For this reason, 2%-4% of patients can be screened in the USA [8-10].

These images are processed in effective artificial intelligence algorithms, providing great convenience to healthcare professionals in disease detection and diagnosis. Artificial intelligence technologies make training both in software and hardware an effective solution [9].

Thanks to the effective feature extraction and learning of convolutional neural networks, effective classifications, namely detection and diagnosis, can be made in lung cancer as well as in many diseases by using CNNs. Among these artificial intelligence technologies, machine learning, deep learning and their derivatives hybrids are used as software. Especially convolutional neural networks (CNN) are very effective in processing images and learning by extracting features from these images [11]. Employees of the world's leading artificial intelligence research companies are trained on LDCT volumes and work on cancer risk prediction with effective CNN models [8, 12]. Recently, many promising CNN models have been applied to disease diagnosis. Alakwaa et al. [13] detected lung cancer using CNN and 3D images. Welch et al. [14] used AlexNet for lung cancer classification.

The main purpose of these studies is to reach high-accuracy results in a short time in lung cancer images. For this purpose, AlexNet [15], VGG [16], DCNN [17] and DenseNet [18] models were used. In another study, it achieved an accuracy score of 97.27% using the AlexNet-based model and the LIDC-IDRI dataset [19]. In another study, lung cancer detection was performed using the segmentation method together with deep learning [20].

Considering the above studies, we come across many successful studies on the detection of lung cancer.

In this study, it is aimed to meet the increasing number of scans with high accuracy rates by using artificial intelligence.

The main contributions of this study can be summarized as follows.

- For the first time, hybrid learning method is applied to this dataset.
- It achieves the most successful result in the literature.

The next parts of the study are as follows. The second section is material and method, the third section is experimental results, and the last section is conclusion.

2. MATERIALS AND METHODS

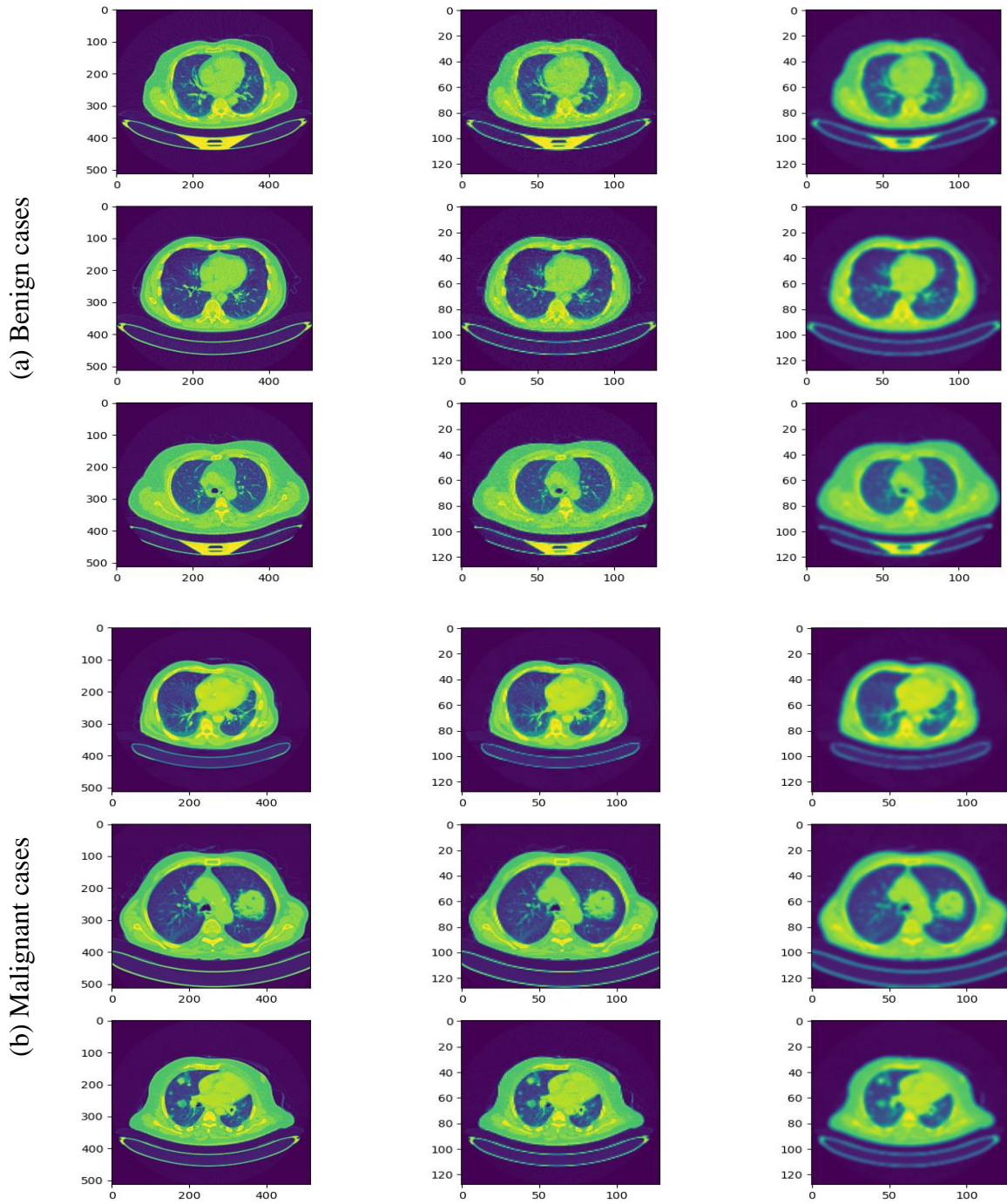
In this section, general information about the dataset and the techniques and algorithms used in the study will be mentioned.

2.1. Dataset

The dataset consisting of images of lung patients diagnosed with computed tomography (CT) was obtained in Iraq-Oncology Training Hospital/National Cancer Diseases Center (IQ-OTH/NCCD) [21] over a period of three months. Among the subjects that make up the dataset, there are images of healthy and cancer patients with different stages. 110 cases in the dataset are divided into 3 classes as normal, benign and malignant, and it consists of 1190 images in total. The number of malignant cases is 40, benign cases are 15 and the number of normal cases is 55.

110 cases participating in CT scans differ according to gender, age, education level, area of residence and living situation. As can be seen from the number of cases that make up the dataset, the dataset has an uneven distribution. The SMOTE technique, which we will explain below, has been applied to eliminate this problem.

Figure 1 shows some sections belonging to three classes from the dataset consisting of lung images.



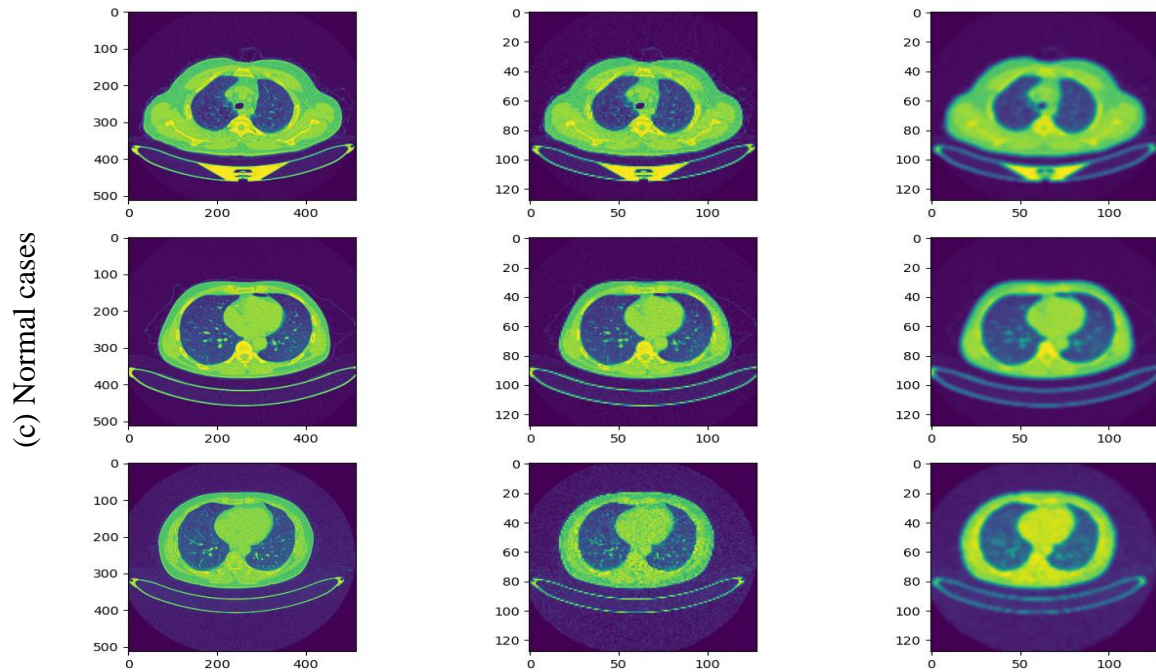


Figure 1. Class status of lung images

2.2. SMOTE

It is one of the effective methods used to stabilize an unbalanced data set. The Synthetic Minority Oversampling Technique, which tries to avoid the overfitting problem, is called SMOTE [22]. In this method, instead of multiplying the number of minority instances, it creates new instances of minority class synthetically by interpolating between instances of the minority class that are close to each other.

2.3. CNN Features Extraction and CNN Classification

Deep learning and CNN architectures, which are included in machine learning and have a wide area, are successfully used in feature extraction and classification. CNNs are especially effectively used to process visual data or images [23]. CNNs are used in this regard and as an excellent tool for image processing on the computer. To improve the performance of a CNN structure with low-value bit-width activation and low-precision weights, Zhuang et al. proposed a two-stage optimization technique [24]. In another study, they developed a GVCNN (group view convolutional neural network), a CNN network that can perform effectively in 3D shape recognition [25]. In addition to these studies, CNN architectures in an energy efficient reconfigurable accelerator [26], in image segmentation [27] and image fusion [28] is used. CNN architectures do relatively less preprocessing in feature extraction than other machine learning algorithms. In feature extraction, the process that is independent of human effort and prior knowledge is a great advantage and convenience.

CNNs are effectively used for feature extraction from images. In our study, we classify medical lung cancer images as multiple in both CNN architecture and classical machine learning models by using these features of CNNs. The CNN architectures we used for feature extraction are given in Table 1 and the CNN architectures we used for classification in Table 2.

Table 1. CNN feature extraction architecture

| Type of Layers | Type of Data | Dimension of Data |
|--------------------|--------------|--------------------|
| Input layer | Float 32 | (None, 64, 64, 1) |
| Conv2D | Float 32 | (None, 64, 64, 16) |
| MaxPooling2D | Float 32 | (None, 32, 32, 16) |
| BatchNormalization | Float 32 | (None, 32, 32, 16) |
| Conv2D_1 | Float 32 | (None, 30, 30, 32) |

| | | |
|-----------------------------|-----------------|----------------------------|
| <i>Conv2D_2</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 28, 28, 64)</i> |
| <i>MaxPooling2D_1</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 14, 14, 64)</i> |
| <i>BatchNormalization_1</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 14, 14, 64)</i> |
| <i>Conv2D_3</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 12, 12, 128)</i> |
| <i>Conv2D_4</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 10, 10, 256)</i> |
| <i>Flatten</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 25600)</i> |
| <i>Dropout</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 25600)</i> |
| <i>Dense</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 256)</i> |
| <i>BatchNormalization_2</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 256)</i> |
| <i>Dropout_1</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 256)</i> |
| <i>Dense_1</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 128)</i> |
| <i>BatchNormalization_3</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 128)</i> |
| <i>Dense_2</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 64)</i> |
| <i>BatchNormalization_4</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 64)</i> |
| <i>Dropout_2</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 64)</i> |
| <i>Dense_3</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 32)</i> |
| <i>BatchNormalization_5</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 32)</i> |
| <i>Dense_4</i> | <i>Float 32</i> | <i>(None, 7)</i> |

Table 2. CNN classification architecture

| Type of Layers | Type of Data | Dimension of Data |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|
| Input layer | Float 32 | (None, 64, 64, 1) |
| Conv2D | Float 32 | (None, 64, 64, 16) |
| MaxPooling2D | Float 32 | (None, 32, 32, 16) |
| BatchNormalization | Float 32 | (None, 32, 32, 16) |
| Conv2D_1 | Float 32 | (None, 30, 30, 32) |
| Conv2D_2 | Float 32 | (None, 28, 28, 64) |
| MaxPooling2D_1 | Float 32 | (None, 14, 14, 64) |
| BatchNormalization_1 | Float 32 | (None, 14, 14, 64) |
| Conv2D_3 | Float 32 | (None, 12, 12, 128) |
| Conv2D_4 | Float 32 | (None, 10, 10, 256) |
| Flatten | Float 32 | (None, 25600) |
| Dropout | Float 32 | (None, 25600) |
| Dense | Float 32 | (None, 256) |
| BatchNormalization_2 | Float 32 | (None, 256) |
| Dropout_1 | Float 32 | (None, 256) |
| Dense_1 | Float 32 | (None, 128) |
| BatchNormalization_3 | Float 32 | (None, 128) |
| Dense_2 | Float 32 | (None, 64) |
| BatchNormalization_4 | Float 32 | (None, 64) |
| Dropout_2 | Float 32 | (None, 64) |

| | | |
|----------------------|----------|-------------|
| Dense_3 | Float 32 | (None, 32) |
| BatchNormalization_5 | Float 32 | (None, 32) |
| Dense_4 | Float 32 | (None, 7) |
| Dense_5 | Float 32 | (None, 128) |
| Dense_6 | Float 32 | (None, 1) |

2.4. Machine Learning

Decision tree classifiers (DTCs) are used effectively in many different fields such as character recognition, medical diagnosis, radar signal classification and speech recognition. Perhaps the most important feature of DTCs is their ability to find solutions that are easier to segment and interpret, by making the complex decision-making process simpler. Considering the advantages of DTCs over single-state classifiers, it has come to the forefront among other machine learning algorithms thanks to its features such as decision and search strategies, tree structure design, and feature selection at each internal node [29].

Random forest can be defined as a classifier, an integrated learning mode that includes multiple decision trees. Each tree forming the random forest can be defined as a classifier that trains a randomly retrieved piece from the sample set. In this way, multitree classifiers form a specific training model classifier matrix. Finally, this integrated classifier, which consists of many classifier trees, can classify in the processed dataset thanks to the majority vote method [30].

The K-nearest neighbor (KNN) algorithm is one of the effective statistical and machine learning classification algorithms for pattern recognition. It is among the simplest learning algorithms [31]. The main idea of this algorithm is to classify an instance in the feature space and assign the instance to the class to which the majority of K instances are closest to the sample to be classified. Thanks to the selected neighbors, the sample can be correctly classified [32]. One disadvantage of KNN is that it requires very large amounts of computation in time.

Support vector machines (SVM) are a supervised machine learning algorithm for regression and classification. The feature of SVM is that it minimizes the empirical classification error and can perform classification and regression by maximizing the geometry margin. The SVM mapping can divide the data into higher dimensional spaces by creating a maximum separating hyperplane of the input vector. Creates two parallel planes on either side of the hyperplane that separates the data. The separating hyperplane works by maximizing the distance between two parallel hyperplanes. The larger the margin or distance between these parallel hyperplanes, the better the classification performance.

Bayes' theorem is a statistical method and dates back to ancient times. Naive Bayes (NB) is an algorithm based on Bayes' theorem and the independent hypothesis of characteristic conditions. It is based on the input/output joint probability distribution based on the independent hypothesis of characteristic conditions. According to this model, the output y with the maximum probability is calculated by Bayes' theorem for the input. This algorithm has simple implementation and high prediction efficiency [33].

A multi-layer perceptron (MLP) is a feed-forward artificial neural network consisting of one or more layers. An MLP consists of at least three layers: input, hidden, and output layers, respectively. In MLP, it is built without specifying the number of hidden layers and there is no limit to the number of neurons in the input layer. MLP is a supervised learning technique [34].

Gradient assisted machine (GBM) is also known as gradient assisted regression tree (GBRT) or gradient tree reinforcement. It is an algorithm in the category of (CART), which is a classifier with simultaneous classification and regression. GBM is known as a member of homogeneous ensembles in which several weak classifiers of the same type are used to construct a prediction model. The trees that make up the algorithm are grown sequentially, and subsequent trees are based on the results of previous trees. The forecast generated for a data forecast is the sum of the forecasts from many trees [35].

The AdaBoost classifier (ABC) was developed to identify the weak classifier that can best separate the weak learning, positive and negative samples. For each feature, the optimal threshold value is determined such that poor learning, the minimum number of samples are misclassified [36].

2.5. Cross Validation

Cross-validation is a statistical resampling method used to evaluate the performance of a machine learning model on data it does not see, as objectively and accurately as possible. The second area of use is to optimize the model for hyperparameters. In the train-test split approach, the dataset to be used in the model is divided into train and test. The model is built with the Train set and the model's performance is evaluated over the test set. Since different accuracy values are obtained as a result of different train-test splits with this method, we cannot say that we can objectively evaluate the performance of the model. Cross-validation is used to achieve this objectivity. The working method of this method is as follows. Cross validation is shown in Figure 2. In this study, the K value determined for cross-validation was chosen as 10.

1. The dataset is shuffled randomly.
2. The dataset is divided into k groups.
3. The following steps are applied for each group.
 - The selected group is used as the validation set.
 - All other groups (k-1 groups) are used as train sets.
 - The model is built using the Train set and evaluated with the validation set.
 - The evaluation score of the model is stored in a list.
4. The statistical summary of the evaluation scores is checked.

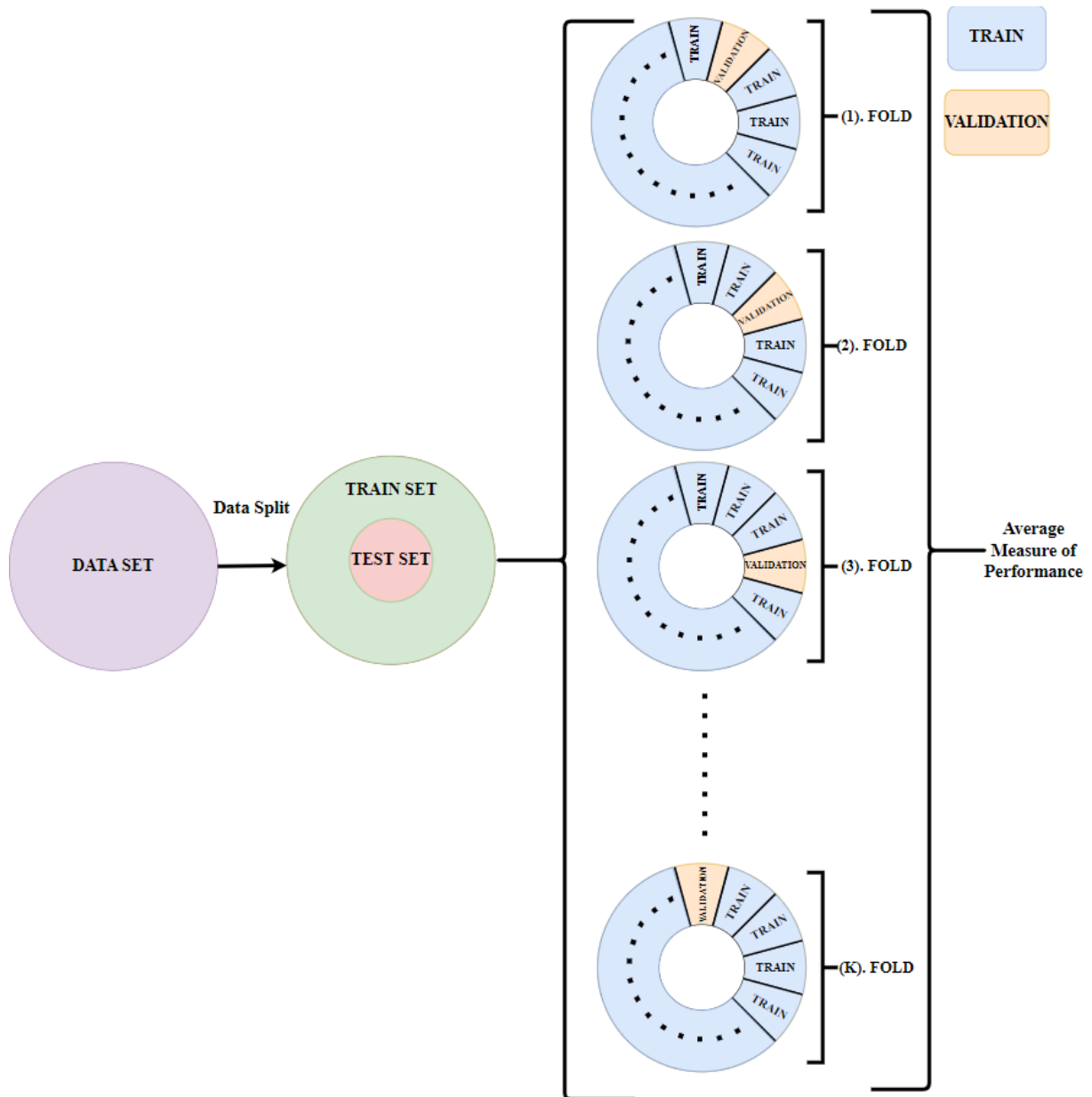


Figure 2. K-fold cross-validation

2.6. Hybrit Learning

In the hybrid learning method we used in our study, first feature extraction using CNN architecture and then classification with both CNN and machine learning algorithms. The flow chart is given in Figure 3.

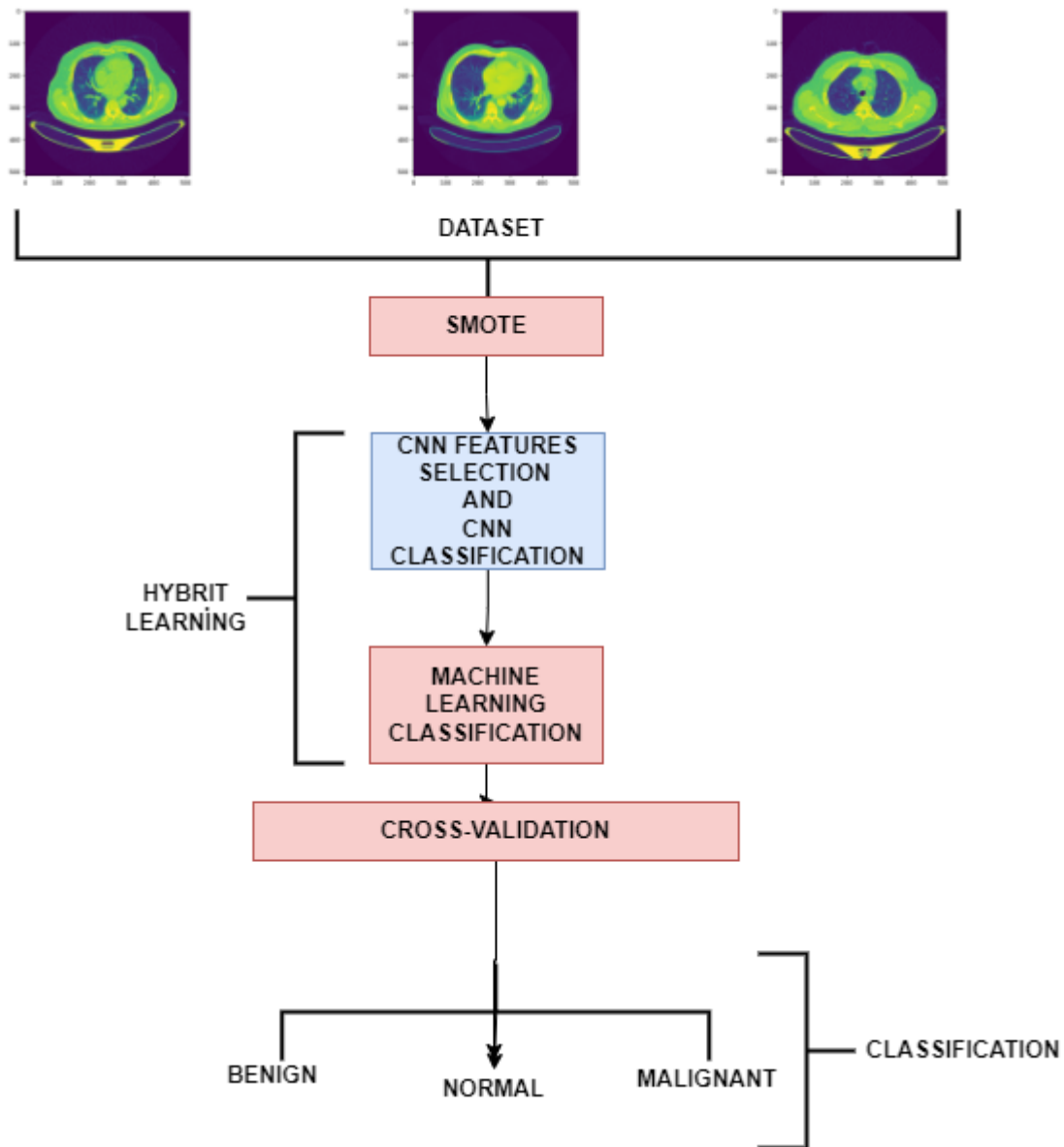


Figure 3. Main operation and hybrid learning flowchart.

In our study, we first applied the technique known as SMOTE to stabilize our unbalanced dataset. Then we resized the images and made them 64 x 64 x 1. Then, we made classification besides feature extraction using our CNN architecture and compared the features we extracted with CNN by subjecting them to classical machine learning algorithms.

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In this section, we present the experimental results we obtained in our study. These results, artificial intelligence algorithms, the proposed method, libraries such as Tensorflow, Numpy, scikit learn and Pandas were used in Anaconda-based Pycharm ide. Nvidia GTX 1060 Max-Q Design was implemented on a system with 6GB GPU, 16GB DDR4 RAM and Intel Core i7-7700HQ processor.

The comparison of our results with each other and with some recent studies in the literature is given in Table 3.

Table 3. Comparison of the methods of the studies

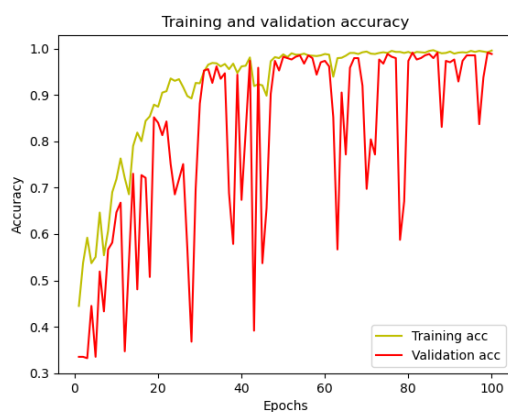
| <i>Reference</i> | <i>Method of study</i> | <i>Accuracy (%)</i> | <i>Preision (%)</i> | <i>Recall (%)</i> | <i>F1-score (%)</i> |
|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
|------------------|------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------|

| | | | | | |
|-----------------|--|--------|--------|--------|--------|
| [11] | AlexNet, VGG, DCNN, DensNet | 97.48 | 97.53 | 97.53 | 97.53 |
| [37] | VGG16,19 Xception | 0.9805 | 0.9804 | 0.9766 | 0.9785 |
| [38] | LeNet, AlexNet, VGG16, ResNet 50, Inception- V1 | 95.28% | - | 96.77% | 95.62% |
| [39] | MobileNet, VGG16, VGG19, DenseNet, ResNet | 56 | 43 | 42 | 42 |
| Proposed method | CNN + ML | 99.70 | 99.71 | 99.71 | 99.71 |

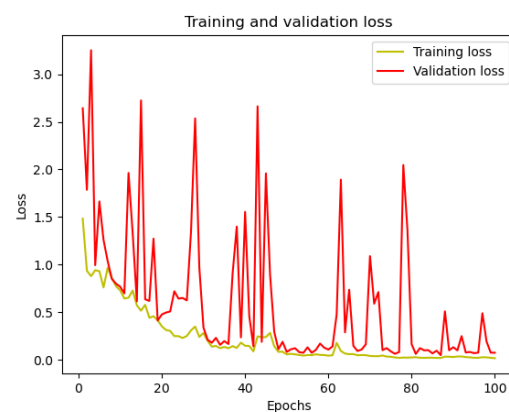
Table 4. Comparison of the methods we tried in our study

| Method | Accuracy (%) | Preision (%) | Recall (%) | F1-score (%) |
|------------------|--------------|--------------|------------|--------------|
| CNN + DT | 98.81 | 98.81 | 98.81 | 98.81 |
| CNN + RF | 99.40 | 99.40 | 99.40 | 99.40 |
| CNN + KNN | 94.36 | 94.36 | 94.36 | 94.36 |
| CNN + SVC | 95.84 | 95.84 | 95.84 | 95.84 |
| CNN + NB | 99.70 | 99.71 | 99.71 | 99.71 |
| CNN + MLP | 99.40 | 99.40 | 99.40 | 99.40 |
| CNN + GBC | 99.70 | 99.71 | 99.71 | 99.71 |
| CNN + ABC | 99.70 | 99.71 | 99.71 | 99.71 |

When Table 4 is examined, it is seen that the best results are CNN + GBC, CNN + ABC and CNN + NB.



(a)



(b)

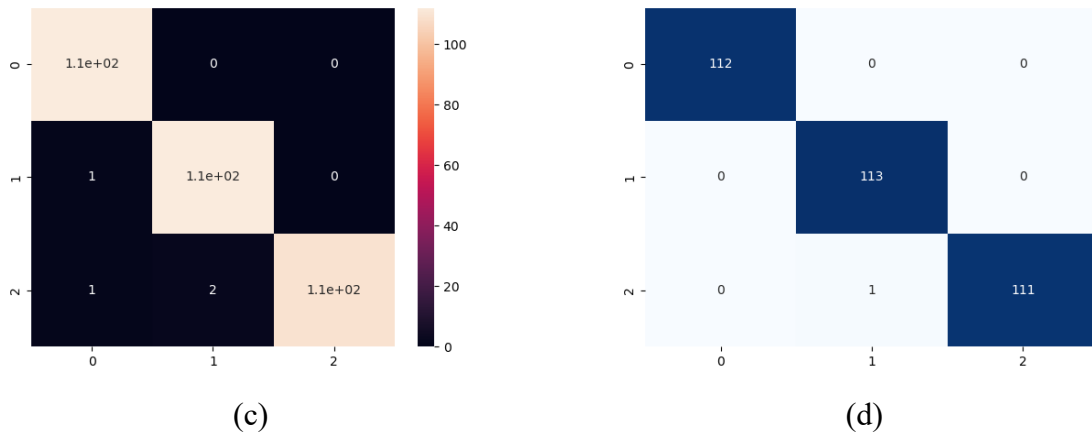


Figure 4. Accuracy (a), loss (b) graphs of CNN classifier in our work, confusion matrix (c) and confusion matrix of best hybrid classifier (d)

Option (a) of Figure 4 represents the accuracy of the CNN architecture, option (b) represents the loss of the CNN architecture, and option (c) and (d) represent the complexity matrix when examined. (0) represents benign, (1) malignant, and (2) normal class.

4.CONCLUSIONS

In this study, various hybrid learning architectures that we propose to detect the stages of lung cancer in humans were applied and compared with each other and with current studies in the literature. The results of our study are the best in the literature and are quite promising. The parameters against which we compare our results are accuracy, precision, recall, f1-score and confusion-matrix. When the results are examined, it is seen that the algorithms learn and make predictions without overfitting thanks to the cross-validation technique we apply, as proven by confusion-matrixes. Our best result comes from the CNN+GBC hybrid architecture. This architecture's accuracy, precision, recall, and f1-score are on average 99.71%. The CNN+GBC hybrid architecture predicted almost all classes correctly. These results will provide great convenience to healthcare professionals in terms of time and cost.

REFERENCES

- [1] Malhotra, J., et al., *Risk factors for lung cancer worldwide*. European Respiratory Journal, 2016. **48**(3): p. 889-902.
- [2] Society, A.C. *Key statistics for lung cancer*. 2021 [2 August 2021]; Available from: https://www.cancer.org/cancer/lung-cancer/about/key-statistics.html#written_by.
- [3] Sung, H., et al., *Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries*. CA: A Cancer Journal for Clinicians, 2021. **71**(3): p. 209-249.
- [4] Saeed, S., et al., *Optimized Breast Cancer Premature Detection Method With Computational Segmentation: A Systematic Review Mapping*, in *Approaches and Applications of Deep Learning in Virtual Medical Care*, N. Zaman, L. Gaur, and M. Humayun, Editors. 2022, IGI Global: Hershey, PA, USA. p. 24-51.
- [5] Nall, R. *What to Know about Lung Cancer*. 2018 [2 April 2022]; Available from: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/323701>.
- [6] *Lung Cancer Risk Factors*. [cited 2022; Available from: <https://www.cancer.org/cancer/lung-cancer/causes-risks-prevention/risk-factors.html>.
- [7] Kay, F.U., et al., *Revisions to the Tumor, Node, Metastasis staging of lung cancer: Rationale, radiologic findings and clinical implications*. World journal of radiology, 2017. **9**(6): p. 269.

- [8] Svoboda, E., *Artificial intelligence is improving the detection of lung cancer*. Nature, 2020. **587**(7834): p. S20-S20.
- [9] Kent, J., *Google develops deep learning tool to enhance lung cancer detection*. Health IT Analytics., 2019.
- [10] Jhohnson, K. *Google's lung cancer detection AI outperforms 6 human radiologists*. 2019 2 August 2021]; Available from: <https://venturebeat.com/2019/05/20/googles-lung-cancer-detection-ai-outperforms-6-human-radiologists/>.
- [11] Lyu, L. *Lung Cancer Diagnosis Based on Convolutional Neural Networks Ensemble Model*. in *2021 2nd International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT)*. 2021. IEEE.
- [12] Ardila, D., et al., *End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography*. Nature Medicine, 2019. **25**(6): p. 954-961.
- [13] Alakwaa, W., M. Nassef, and A. Badr, *Lung cancer detection and classification with 3D convolutional neural network (3D-CNN)*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2017. **8**(8).
- [14] Welch, H.G., L.M. Schwartz, and S. Woloshin, *Are Increasing 5-Year Survival Rates Evidence of Success Against Cancer?* JAMA, 2000. **283**(22): p. 2975-2978.
- [15] Krizhevsky, A., I. Sutskever, and G.E. Hinton, *ImageNet classification with deep convolutional neural networks*. In *Advances in Neural Information Processing Systems 25*. Go to reference in article, 2012.
- [16] Simonyan, K. and A. Zisserman, *Very deep convolutional networks for large-scale image recognition*. arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.
- [17] Jiao, Z., et al., *A deep feature based framework for breast masses classification*. Neurocomputing, 2016. **197**: p. 221-231.
- [18] Huang, G., et al., *Densely connected convolutional networks*. CVPR. IEEE Computer Society, 2017: p. 2261-2269.
- [19] Gupta, P. and A.P. Shukla. *Improving Accuracy of Lung Nodule Classification Using AlexNet Model*. in *2021 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*. 2021.
- [20] Shimazaki, A., et al., *Deep learning-based algorithm for lung cancer detection on chest radiographs using the segmentation method*. Scientific Reports, 2022. **12**(1): p. 727.
- [21] Alyasriy, H. and A. Muayed, *The IQ-OTHNCCD lung cancer dataset*. Mendeley Data, 2021. **1**: p. 2020.
- [22] Chawla, N.V., et al., *SMOTE: synthetic minority over-sampling technique*. Journal of artificial intelligence research, 2002. **16**: p. 321-357.
- [23] Plamondon, R. and S.N. Srihari, *Online and off-line handwriting recognition: a comprehensive survey*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000. **22**(1): p. 63-84.
- [24] Zhuang, B., et al. *Towards effective low-bitwidth convolutional neural networks*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018.
- [25] Feng, Y., et al. *Gvcnn: Group-view convolutional neural networks for 3d shape recognition*. in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018.

- [26] Chen, Y.H., et al., *Eyeriss: An Energy-Efficient Reconfigurable Accelerator for Deep Convolutional Neural Networks*. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017. **52**(1): p. 127-138.
- [27] Chen, L.C., et al., *DeepLab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018. **40**(4): p. 834-848.
- [28] Acharya, U.R., et al., *Deep convolutional neural network for the automated detection and diagnosis of seizure using EEG signals*. Computers in Biology and Medicine, 2018. **100**: p. 270-278.
- [29] Safavian, S.R. and D. Landgrebe, *A survey of decision tree classifier methodology*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1991. **21**(3): p. 660-674.
- [30] Wager, S. and S. Athey, *Estimation and Inference of Heterogeneous Treatment Effects using Random Forests*. Journal of the American Statistical Association, 2018. **113**(523): p. 1228-1242.
- [31] Song, G., et al., *K Nearest Neighbour Joins for Big Data on MapReduce: A Theoretical and Experimental Analysis*. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2016. **28**(9): p. 2376-2392.
- [32] Zhang, X., et al., *KRNN: k Rare-class Nearest Neighbour classification*. Pattern Recognition, 2017. **62**: p. 33-44.
- [33] Amor, N.B., S. Benferhat, and Z. Elouedi. *Naive bayes vs decision trees in intrusion detection systems*. in *Proceedings of the 2004 ACM symposium on Applied computing*. 2004.
- [34] Ravi, V., D. Pradeepkumar, and K. Deb, *Financial time series prediction using hybrids of chaos theory, multi-layer perceptron and multi-objective evolutionary algorithms*. Swarm and Evolutionary Computation, 2017. **36**: p. 136-149.
- [35] Tama, B.A. and K.-H. Rhee, *An in-depth experimental study of anomaly detection using gradient boosted machine*. Neural Computing and Applications, 2019. **31**(4): p. 955-965.
- [36] Zhao, Y., et al., *Detecting tomatoes in greenhouse scenes by combining AdaBoost classifier and colour analysis*. Biosystems Engineering, 2016. **148**: p. 127-137.
- [37] Humayun, M., et al., *A Transfer Learning Approach with a Convolutional Neural Network for the Classification of Lung Carcinoma*. Healthcare, 2022. **10**(6): p. 1058.
- [38] Naseer, I., et al., *Performance Analysis of State-of-the-Art CNN Architectures for LUNA16*. Sensors, 2022. **22**(12): p. 4426.
- [39] Mohite, A., *Application of Transfer Learning Technique for Detection and Classification of Lung Cancer using CT Images*.



Detection and Tracking of Moving Objects with Unmanned Aerial Vehicles

Elif Ece ELMAS^{1,*} Mustafa ALKAN²

¹National Defence University, Alparslan Defence Sciences and National Security Institute, Department of Military Electronic Systems Engineering, 06654, Bakanlıklar/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Computer Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article
Received: 4.11.2022
Revision: 28.11.2022
Accepted: 28.11.2022

Highlights

- Optical flow
- MATLAB GUI
- Unmanned Aerial Vehicle

Keywords

Unmanned Aerial Vehicle
Image Processing
Optical Flow
Motion Detection
Object Tracking

The usage areas of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) systems are becoming widespread and diversified thanks to the developments in technology. UAVs are used for many different purposes. In this article, an Optical Flow method is proposed for the detection and tracking of moving objects with images acquired by a camera on a flying UAV. A software using Optical Flow methods developed in the MATLAB Graphical User Interface environment has been developed for real-time detection and tracking of moving objects in the snapshots taken from the cameras of an UAV. For the selection of the most suitable optical flow algorithm for the solution of the problem, the methods used in Optical Flow methods, which are gathered under the main classes of difference techniques, field-based techniques, energy-based techniques and phase-based techniques, were applied and the results obtained were compared. General structure of detection and tracking of moving objects with a UAV(Figure A).

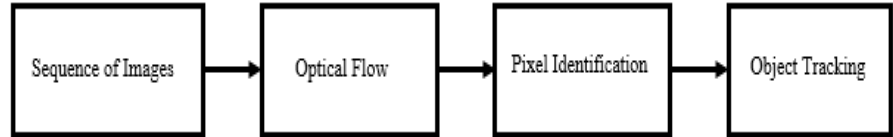


Figure A. General structure of detection and tracking of moving objects with a UAV

Purpose: In this article, it is aimed to implement a software that uses Optical Flow methods developed in the MATLAB Graphical User Interface environment for real-time detection and tracking of moving objects from snapshots taken from the cameras of a UAV.

Theory and Methods: Optical flow algorithms, which are frequently used in the literature, are examined for tracking moving objects in the images taken from the cameras of an unmanned aerial vehicle. Each method has been tested using the “Translating and Diverging Tree sequences”. The vectorial results of the tested algorithms of the direction and intensity in the image were examined.

Results: According to the results of the optical flow algorithm examined for tracking moving objects, it was seen that the best results for the “Translating and Diverging Tree sequences” were obtained from the Horn & Schunck and Lucas & Kanade methods.

Conclusion: In this article, real-time detection and tracking of moving objects from images taken from a vertical camera is done with a software using Optical Flow methods developed in MATLAB. In order to select the most suitable Optical Flow algorithm, the difference, area, energy and phase-based methods used in Optical Flow methods were tested in MATLAB environment and the results obtained were compared. An application has been written in the MATLAB GUI Interface environment to detect and track moving objects with the Optical Flow method from the images taken from the drone's camera. The obtained results were found to be quite successful.



Detection and Tracking of Moving Objects with Unmanned Aerial Vehicles

Elif Ece ELMAS^{1,*} Mustafa ALKAN²

¹Millî Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri ve Millî Güvenlik Enstitüsü, Askerî Elektronik Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı, 06654, Bakanlıklar/ ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar/ANKARA

Abstract

With the developments in technology, the usage areas of Unmanned Air Vehicle (UAV) systems become widespread and diversify. Nowadays, UAVs are used for many different purposes such as remote sensing, photogrammetry, traffic control and monitoring of large facilities. UAVs used for remote sensing and photogrammetry can be equipped with different sensor systems which can be in the form of video, digital, thermal and infrared camera according to their intended use. In this paper, an Optical Flow method is proposed for the detection and tracking of moving objects with the images obtained with the camera found in a Flying UAV. The main problem to be solved when trying to detect objects moving from a flying UAV is to separate the changes in the image caused by the movement of the vehicle from moving objects. Within the scope of this paper, it was done with MATLAB Graphical User Interface developed Optical Flow methods for real-time detection and tracking of moving objects from snapshots taken from a quadcopter camera. Field-based techniques, energy-based techniques and phase-based techniques used in Optical Flow methods were tested and the results obtained were compared in order to select the most suitable Optical Flow algorithm.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 4.11.2022
Düzeltilme: 28.11.2022
Kabul: 28.11.2022

Keywords

Unmanned Aerial Vehicle
Image Processing
Optical Flow
Motion Detection
Object Tracking

Anahtar Kelimeler

İnsansız Hava Aracı
Görüntü İşleme
Optik Akış
Hareket Tespiti
Nesne Takibi

İnsansız Hava Araçlarıyla Hareketli Nesnelerin Tespit ve Takibi**

Öz

Teknolojide elde edilen gelişmelerle birlikte İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin kullanım alanları yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. Günümüzde İHA'lar uzaktan algılama, fotogrametri, trafik denetimi ve büyük tesislerin gözetimi gibi birçok farklı amaçla kullanılmaktadırlar. İHA'lar tarafından fotogrametri ve uzaktan algılama görevlerinin yerine getirilmesi istediğinde video, dijital, termal ve kızıl ötesi kamera gibi farklı algılayıcı sistemler yerleştirilebilmektedir. Bu makalede uçan bir İHA'da bulunan kamerayla elde edilen görüntülerle hareketli nesnelerin tespiti ve takibi için bir Optik Akış yöntemi önerilmiştir. Uçan bir İHA'dan hareket eden nesnelere tespit etmeye çalışırken çözülmesi gereken asıl problem, aracın hareketinin neden olduğu görüntüdeki değişiklikleri hareketli nesnelere ayırmaktır. Bu makalede, bir İHA'nın kameralarından alınan anlık görüntülerden hareketli nesnelerin gerçek zamanlı olarak tespit ve takip edilmesi için MATLAB Grafiksel Kullanıcı Arayüzü ortamında geliştirilen Optik Akış yöntemlerinin kullanıldığı bir yazılım ile yapılmıştır. En uygun Optik Akış algoritmasının seçilebilmesi için Optik Akış yöntemlerinde kullanılan; fark teknikleri, alan tabanlı teknikler, enerji tabanlı teknikler ve faz tabanlı teknikler ana sınıfları altında toplanan yöntemler uygulanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojide elde edilen gelişmelerle birlikte İnsansız Hava Aracı (İHA) sistemlerinin kullanım alanları yaygınlaşmakta ve çeşitlenmektedir. İHA'lar, uzaktan algılama, istihbarat ve güvenlik amaçlı kullanım, kıyı ve sahil şeritlerinin izlenmesi, hassas bölgelerin gözlenmesi (havaalanları, yollar, tren rayları, nehirler,

** Bu çalışma, Bir İnsansız Hava Aracı Gerçekleştirme Ve Hareketli Nesnelerin Tespit Ve Takibinde Kullanımı tezinden düzenlenmiştir.

barajlar, boru hatları, vb.), haritacılık, arama/kurtarma çalışmaları, meteorolojik verilerin takibi, yangın izleme, tarımsal uygulamalar, kentsel dönüşüm çalışmaları, doğal afetlerin gözlemlenmesi, şehir içi trafik uygulamaları vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

“İHA, kendisini kullanan insanı taşımayan, kaldırma kuvveti oluşturmak için aerodinamik kuvvetleri kullanan, kendi başına uçabilen veya uzaktan kumanda edilebilen, sarf edilebilir veya yeniden kullanılabilir ve öldürücü veya öldürücü olmayan faydalı yük taşıyabilen motorlu hava aracı olarak tanımlanmaktadır [2]”. İHA’lar tarafından icra edilecek görev özelinde olmak üzere, görüntüleme, veri toplama, ölçüm yapma, vb. işlemlere yönelik olarak taşınan tüm sistemler, hedefin algılanması-işaretlenmesi, algılayıcı sistemleri, mühimmatlar, kendini koruma sistemleri ve iz azaltıcı/artırıcı sistemler Görev Sistemleri ya da Faydalı Yük olarak tanımlanmaktadır.

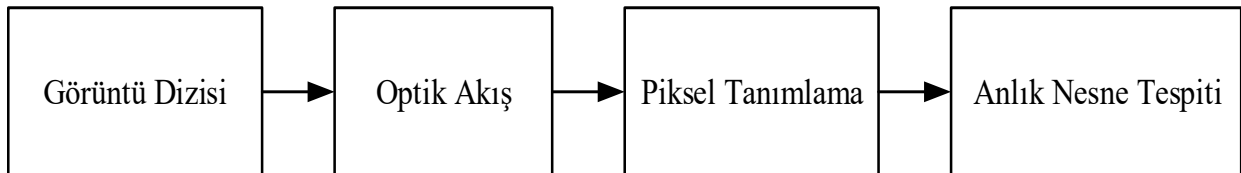
Günümüzün görev sistemlerinin önemli bir kısmını görüntü sensörleri oluşturmaktadır. Günümüzde Elektro Optik (EO) ve Kızılötesi (IR) kameralar ile Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistemleri sıklıkla kullanılan görüntü sensörlerindedir. Bu sensörlere ilaveten askeri uygulamalar kapsamında kullanılan Hiperspektral ve Multispektral kameralar da yer almaktadır. Lazer mesafe bulucu ve lazer işaretleyici sistemler kullanılarak hedeflerin mesafe ve hız bilgisi anlık olarak yüksek doğrulukta alınmaktadır. Ayrıca lazer güdümlü mühimmatlar için de hedefler işaretlenebilmektedir. Sinyal istihbaratının sağlanması amacıyla haberleşme ve elektronik istihbarat faydalı yükleri ile yön belirleme (D/F) sistemlerinden fazlaca faydalanılmaktadır. Kimyasal, biyolojik radyolojik ve nükleer (KBRN) tespit sensörleri, ile manyometreler, karbondioksit, metan ve hidrokarbon tespit eden sensörlerden İHA’larda yararlanılmaktadır. Aktif uzaktan algılama yöntemlerinden LIDAR (Light Detection and Ranging) da uzaklık ölçümü için lazer darbeleri ve ışık kullanarak arazinin ve yerdeki nesnelerin üç boyutlu görüntülerinin hassas olarak ölçülerek belirlenmesini sağlamaktadır. Haberleşme için kullanılan faydalı yükler aracılığıyla ses ve veri, çok daha uzun mesafelere ya da normal yöntemlerle kapsanamamış olan alanlara iletilebilmektedir [2,3].

Bu makalede, bir İHA da bulunan normal bir kameradan alınan anlık görüntülerden hareketli nesnelerin gerçek zamanlı olarak tespit ve takip edilmesi için bir Optik Akış yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem, kameradan alınan görüntü çerçevelerinin bir optik akış algoritması ile karşılaştırılarak değişikliklerin izlenmesine dayanmaktadır [4].

2. HAREKETLİ NESNELERİN TESPİT VE TAKİP YÖNTEMLERİ (DETECTION AND TRACKING METHODS OF MOVING OBJECTS)

Makalenin bu bölümünde, bir İHA’nın kameralarından alınan görüntülerden hareketli nesnelerin tespit ve takip edilmesi ele alınmıştır. Sayısal görüntülerden hareketli nesne tespiti ve takibi, bilgisayarlı görü [5] (computer vision) alanı içerisindedir. Bilgisayarlı görüş alanında hareket analizi en önemli araştırma başlıklarından birisidir. Görüntülerdeki hareket analizi görüntü işleme konusundaki pek çok problemin, görsel takip, hareket yapısı vb gibi, temelini oluşturmaktadır [6].

Uçan bir İHA’dan hareket eden nesnelere tespit etmeye çalışırken çözülmesi gereken asıl problem, aracın hareketinin neden olduğu görüntüdeki değişiklikleri hareketli nesnelere ayırmaktır. Bu durumda problem hareketli kamerayla hareketli nesnelerin tespiti gibi çözülmesi çok daha zor bir hal almaktadır [7-10]. Şekil 1’de hareketli nesnelerin bir İHA ile tespit ve takip işleminin genel yapısı görülmektedir.



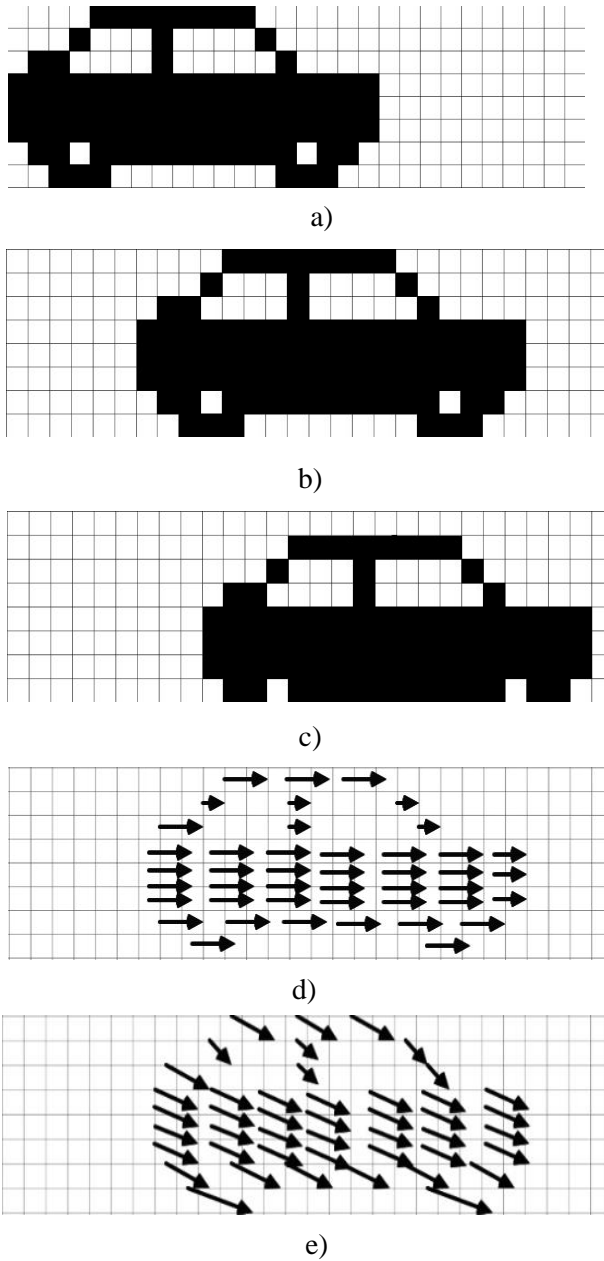
Şekil 1. Hareketli nesnelerin bir İHA ile tespit ve takip işleminin genel yapısı (Figure 1. General structure of detection and tracking of moving objects with a UAV)

Görüntü dizilerinin işlenmesindeki temel problem Optik Akışın veya görüntü hızlarının ölçülmesi zorluğudur. Optik Akış, iki boyutlu hareket alanına yaklaşık bir hesaplama yapmaktadır [11-16]. Şekil 1’de görülen tespit ve takip işleminde bir görüntü dizisinden hareketli nesnelerin, konum, boyut ve hız gibi özellikleri elde edilmektedir.

2.1 Optik Akış (Optical Flow)

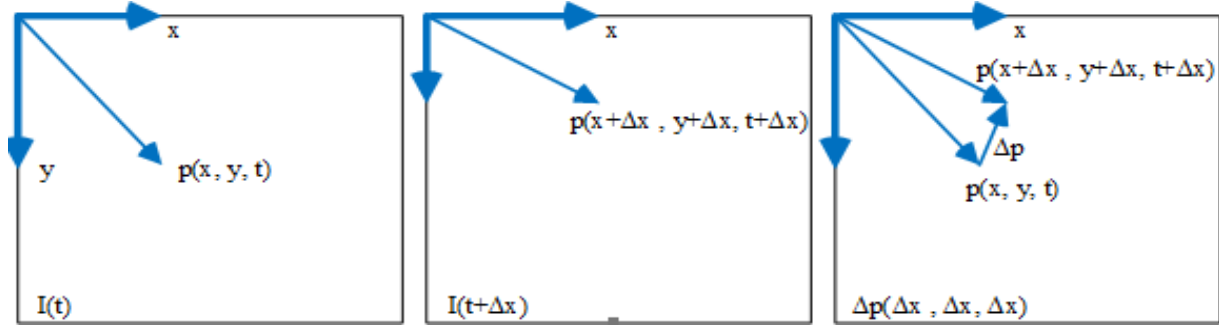
Görüntü dizilerinin işlenmesindeki temel problem Optik Akış'ın veya görüntü hızlarının ölçülmesi zorluğudur. Optik Akış, iki boyutlu hareket alanına yaklaşık bir hesaplama yapmaktadır [17,18].

Şekil 2 a, b ve c'de bir otomobilin üç görüntü karesi boyunca hareketlerini görülmektedir. Şekil 2 d ve e de ise Optik Akış algoritmasının otomobilin birinci ile ikinci görüntü arasındaki ve ikinci ile üçüncü görüntü arasındaki sınır piksellerinin yer değişimlerinin vektörel olarak hız ve yönünü göstermektedir. Şekil 2 d'de otomobil soldan sağa doğru aynı düzlem üzerinde düz bir şekilde ilerlediği için Şekil 2 d'de görüldüğü gibi ilerlemenin yönü ve şiddeti de vektörel olarak aynı yönde olduğu görülmektedir. Otomobil Şekil 2 b'deki konumundan Şekil 2 c konumuna geçerken hem ileri yönde hareket etmiş hem de bir kare aşağı yönde ilerlemiştir. Bu nedenle Şekil 2 e'de görüldüğü gibi ilerlemenin yönü ve şiddeti de değişmiştir. Bu şekildeki görüntülerden tespit edilen nesne hareketlerinin vektörel gösterime Optik Akış denilmektedir.



Şekil 2. Bir otomobilin hareketinin vektörel olarak yönü ve şiddeti (Figure 2 Vector direction and intensity of a car's movement)

Bilindiği gibi 2-boyutlu bir P noktası zamanın içinde $p(x, y, t)$ ile belirtilir. Burada P noktası $I(t)$ çerçeve görüntüsünün elemanıdır ve $p(x, y, t) \in I(t)$ 'dir. Görüntü uzayında ise bir köşe noktası, $p(x, y)$ koordinatları ile gösterilmektedir. Belirtilen (x, y) koordinatları, piksel koordinat sisteminde tanımlanabilmektedir. Bir t anında alınan bir video çerçeve görüntüsü $I(t)$ olarak ifade edilirse, bu çerçeveye göre, $p_i(x_i, y_i, t)$ noktaları, ait oldukları $I(t)$ çerçeve görüntülerinde, başlangıcı piksel koordinat sisteminin orijininde, ucu p_i de bulunan $p_i(x_i, y_i, t)$ yer vektörleri ile ifade edilebilir. Bu durum Şekil 3'te gösterilmiştir [19].



Şekil 3. Optik akış (Figure 3 Optical Flow)

Şekil 3'de görüldüğü üzere, yer değiştirme vektörlerinin geçen Δt süresiyle ölçeklendirilmesiyle, noktaların anlık hız vektörleri, elde edilmektedir. Δp yer değiştirme vektörleri 2-boyutlu olduğundan, v hız vektörleri de 2-boyutludur. Hız vektörlerinin $v(v_x, v_y)$ şeklinde iki bileşeni vardır. O halde, izleme amacıyla belirlenen her bir nokta için, ardışık iki çerçevenin işlenmesinden sonra bir hız vektörü veya eşdeğer olarak bir yer değiştirme vektörü karşılık gelmektedir.

Optik Akış hesaplamaları için birçok farklı yöntemler geliştirilmiştir. Barron ve diğerleri [20] yaptıkları çalışmada Optik Akış için geliştirilmiş farklı algoritmaların özelliklerini ve başarımlarını incelemiştir. Thacker ve diğerlerinin [21] 2008 yılında yayınladıkları Optik Akış tekniklerinin başarımları ile ilgili çalışmada her bir yöntem ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Raudies'in [22] yaptığı çalışmayı genişleterek, başka Optik Akış algoritmalarının da özellikleri ile ilgili yaptığı kapsamlı çalışmanın sonuçlarını 2013 yılında yayınlamıştır. Raudies bu makalesinde, Optik Akış için geliştirilen algoritmaların MATLAB uygulamaları ile gerçek görüntü dizilerinden elde edilen hareket tahminleri vektörel çıktıları ile göstermiştir. Optik akış yöntemleri 4 ana başlık altında sınıflandırılmaktadır [20][23].

1. Fark Yöntemleri, uzamsal-zamansal şiddet türevlerinden görüntü hızını hesaplamaktadır. Bu yöntemler, görüntü parlaklığının uzamsal-zamansal türevlerini temel alan kısıtları kabul etmektedir. Çözüm denklemleri, görselleştirilmiş parçacık görüntü modelinin hemen hemen her yerde yumuşak değiştiği varsayarak, Lagrange türevi kullanılarak türetilmektedir. Bu yöntemlere Horn & Schunck [24], Lucas & Kanade [25], Nagel [26], Uras ve diğ. [27] örnek olarak verilebilir.

2. Eşleştirme Yöntemleri, ilk görüntüdeki piksellerin komşuları ile ikincil piksellerin adayları arasındaki benzerlik özelliklerini eşleştirerek görüntü yer değişimlerini hesaplamaktadır. Bu yöntemler, diferansiyel yöntemlere kıyasla gürültüye karşı daha az hassastır. Ancak, gereken karşılaştırmaların sayısı göz önüne alındığında, işlem zamanı uzundur. Bazı yöntemler hesaplama süresini azaltan özellik çıkarma teknikleriyle birlikte kullanılır. Bu yöntemlere Anandan[28], Little ve diğ.[29] örnek olarak verilebilir.

3. Enerji Temelli Yöntemler hız ayarlı filtre çıkısındaki enerji bilgisini kullanırlar. Bu sınıftaki bazı yöntemler Fourier domenine dayanmaktadır. Bu yöntemlere Heeger[30], Shizawa & Mase[31] örnek olarak verilebilir.

4. Faz Temelli Yöntemler hız ayarlı filtre çıkısındaki faz bilgisini kullanırlar. Bu yöntemlere Fleet & Jepson[32], Sun ve diğ.[33] örnek olarak gösterilebilir.

Bütün farklılıklarına rağmen, bu yöntemlerin çoğu üç adımlık bir süreç izlemektedirler [20]:

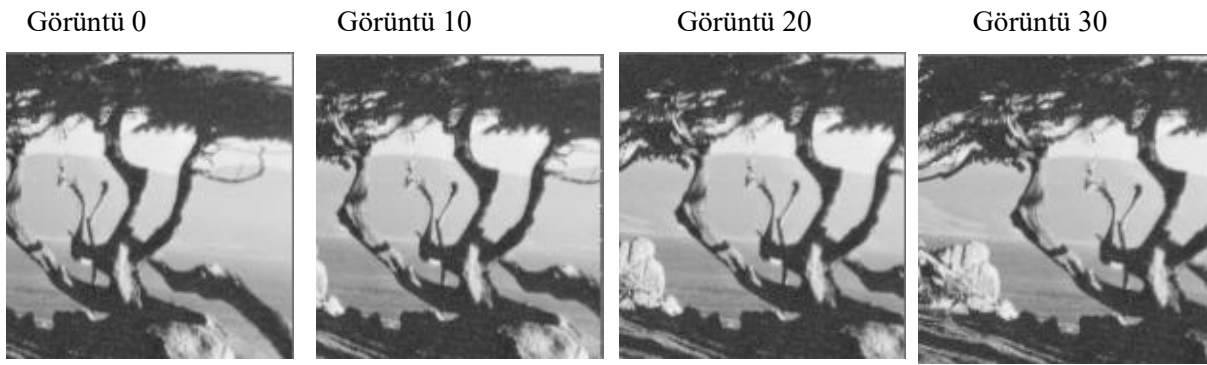
1. Görüntü de istenilen işaret yapısını edinmek ve işaret/gürültü oranını arttırmak amacıyla alçak-geçiren veya bant-geçiren filtre kullanarak ön-filtrelenmesi ya da yumuşatılması,

2. Hızın normal bileşenlerinin hesaplanması için uzay-zamansal türevlerin elde edilmesi gibi temel ölçümlerin bulunması,
3. İki boyutlu akış alanının üretebilmesi amacıyla ön filtreleme ve temel hesaplamaların entegrasyonunun gerçekleştirilmesi.

Optik akış yöntemlerinin karşılaştırması (Comparison of optical flow methods)

Makalede kullanılmak üzere en uygun Optik Akış algoritmasının seçilebilmesi için Raudies'in yaptığı çalışma temel alınarak, Optik Akış yöntemlerinde kullanılan fark, alan eşleştirme, enerji tabanlı ve faz tabanlı ana sınıfları altında toplanan yöntemler MATLAB ortamında uygulanarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Her bir yöntem "Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisi [34]" kullanılarak sınanmıştır. Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisini oluşturan imgelerin dizinin başından ortasından ve sonlarından alınan birkaç örneği Şekil 4'te görülmektedir.



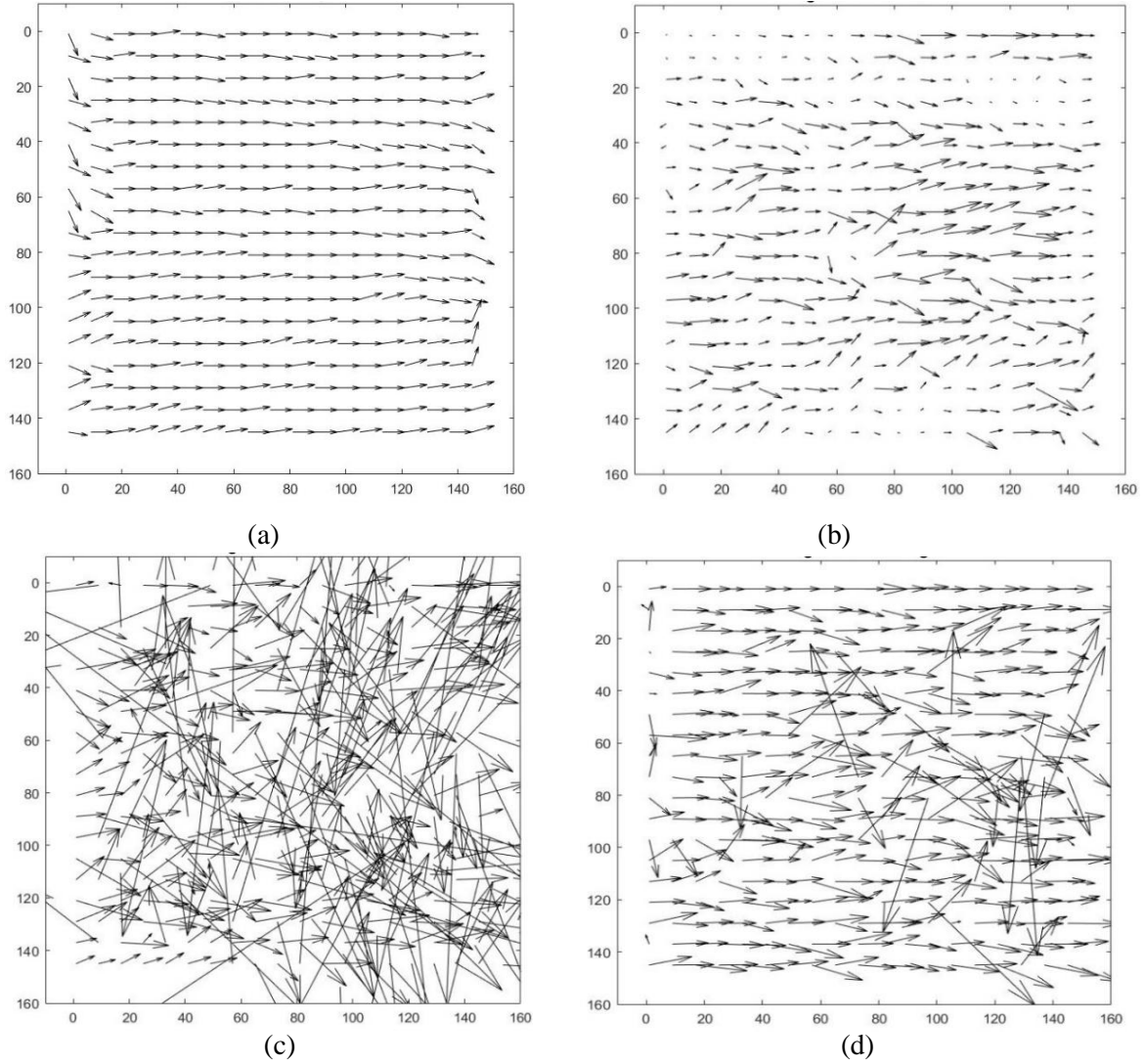
Şekil 4. Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisinin birkaç imge örneği (Figure 4 Example of several images of a Tree's Floating Image Sequence)

Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisi David Fleet tarafından üretilmiştir. Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisi, optik akış yöntemlerinin, kamera hareket tahmininin ve hareket algoritmalarının başarımlarının sınanması ve niceliksel değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmıştır. Dizideki görüntüler, 150x150 piksellik gri seviyeli görüntülerden oluşmaktadır. Görüntüler [34] numaralı referanstan alınmıştır.

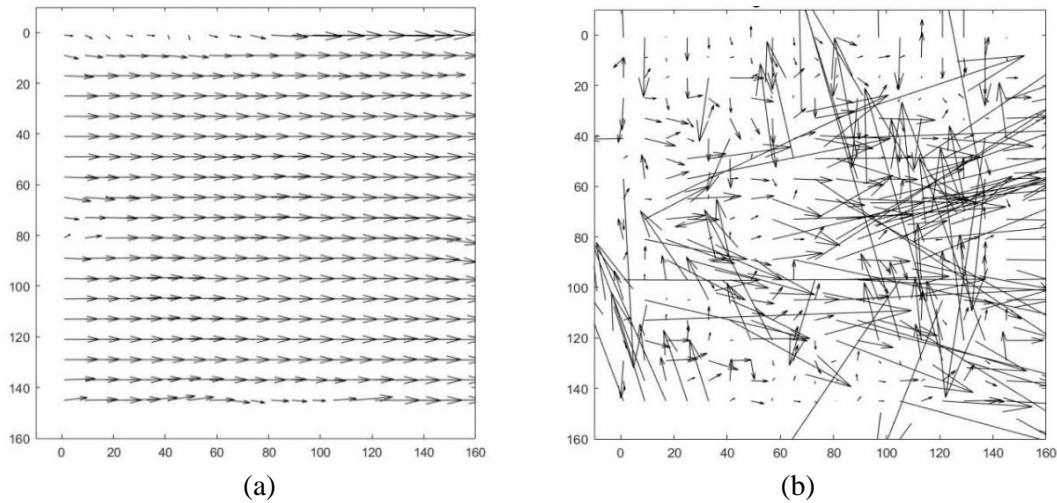
Şekil 4'te gösterilen Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisi kullanılarak, farklı algoritmalara göre elde edilen yön ve şiddete ait vektörel sonuçlar Şekiller 5 – 8'de verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan değerlendirme kriterleri olarak açısız hata ve akış bitiş noktası için ortalama ve standart sapma değerleri ve akış alanının yoğunluğu kullanılmıştır. Her bir optik akış yöntemi, aynı görüntü dizisi ile değerlendirilmiş ve hata sonuçları ve yoğunluk Çizelge 1'de verilmiştir. Değerlendirme çizelgesinde, AHO, açısız hata için derece cinsinden ortalama değerini, ABNO, her pikseldeki akış bitiş noktası için piksel cinsinden ortalama değerlerini, AHSS, açısız hatanın derece cinsinden standart sapmasını, SNSS, akış son noktası için piksel cinsinden standart sapmasını göstermektedir.

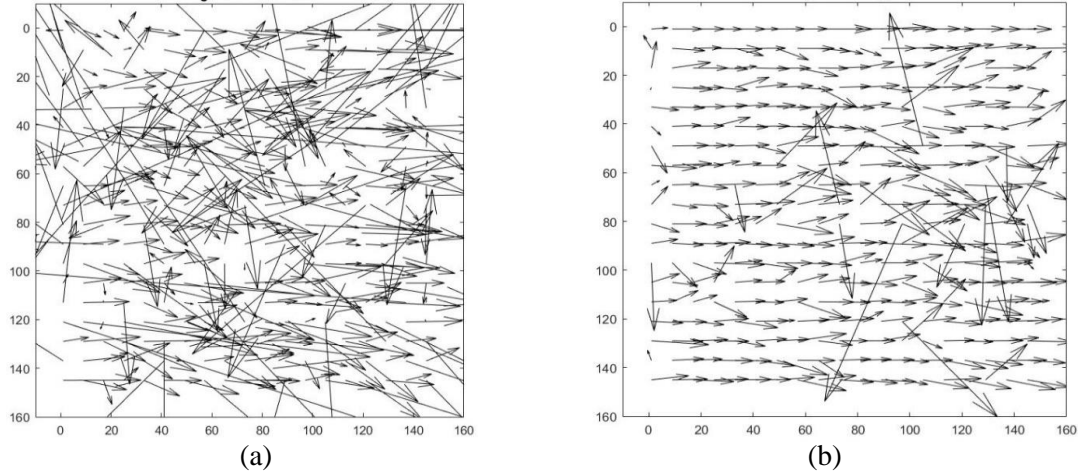
Yoğunluk ölçümü için, kare başına 15 pikselden daha büyük yer değiştirmelerin sınanan yöntemden kaynaklanamayacağı kabul edilmiştir. Bu nedenle, hata hesaplamasında yalnızca kare başına 15 pikselden küçük akış normuna sahip pikseller dikkate alınmıştır. Ölçülen yoğunluk, geçerli ya da var sayılan akış ölçümleriyle görüntüdeki piksellerin yüzdesini göstermektedir.



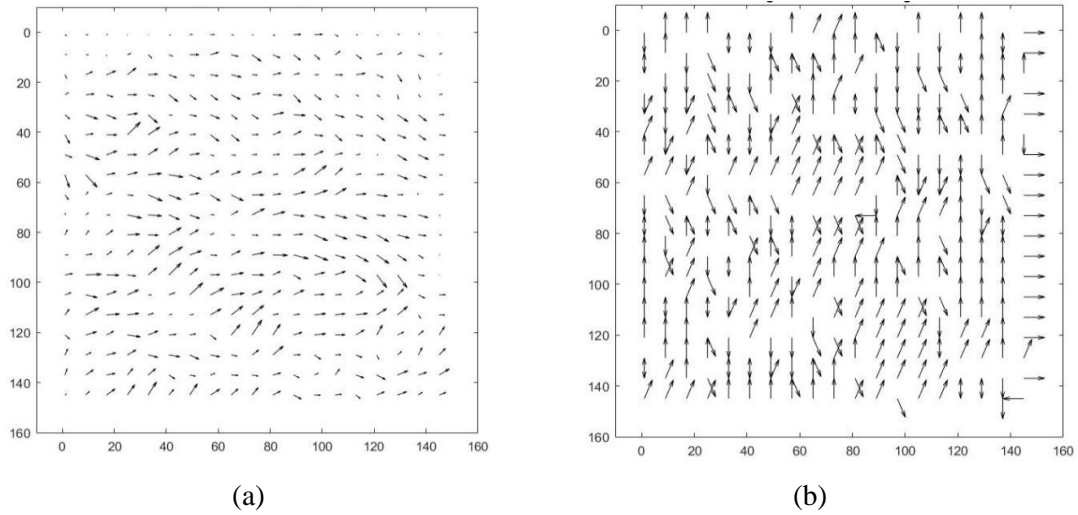
Şekil 5. Bir ağacın kayan görüntü dizisinin örneklenmesi a) Horn Schunck b) Lucas Kanade c) Nagel d) Uras ve diğ. (Figure 5 Example of a scrolling image sequence of a tree a) Horn Schunck b) Lucas Kanade c) Nagel d) Uras et al.)



Şekil 6. Bir ağacın kayan görüntü dizisinin örneklenmesi a) Anandan b) Little ve diğ. (Figure 6 Example of a scrolling image sequence of a tree a) Anandan b) Little et al.)



Şekil 7. Bir ağacın kayan görüntü dizisinin örneklenmesi a) Heeger b) Shizawa & Mase (Figure 7 Example of a scrolling image sequence of a tree a) Heeger b) Shizawa & Mase)



Şekil 8. Bir ağacın kayan görüntü dizisinin örneklenmesi a) Fleet & Jepson b) Sun ve diğ. (Fig. 8 Example of a scrolling image sequence of a tree a) Fleet & Jepson b) Sun et al.)

Değerlendirme çizelgesinde, AHO, açılma hatası için derece cinsinden ortalama değerini, ABNO, her pikseldeki akış bitiş noktası için piksel cinsinden ortalama değerlerini, AHSS, açılma hatasının derece cinsinden standart sapmasını, SNSS, akış son noktası için piksel cinsinden standart sapmasını göstermektedir.

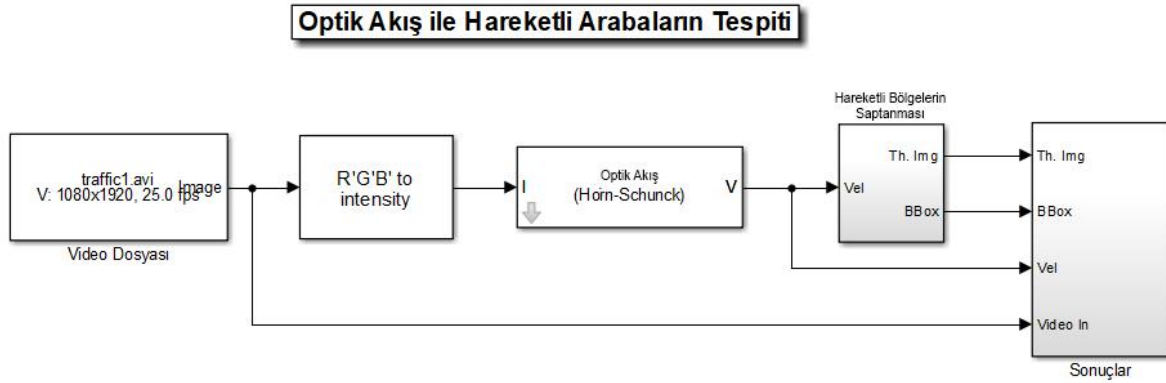
Çizelge 1. Farklı optik akış yöntemleri için hata sonuçları ve yoğunluk (Table 1. Error results and density for different optical flow methods)

| | AHO | ABNO | AHSS | SNSS | Yoğunluk |
|----------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| Horn & Schunck | 51,673 | 3,604 | 39,182 | 3,211 | 97,313 |
| Lucas & Kanade | 45,100 | 1,527 | 42,135 | 3,394 | 96,680 |
| Nagel | 62,099 | 4,979 | 47,853 | 4,259 | 65,989 |
| Uras ve diğ. | 75,877 | 2,592 | 49,535 | 4,258 | 76,233 |
| Anandan | 54,993 | 5,702 | 50,770 | 3,728 | 75,531 |
| Little ve diğ. | 74,178 | 5,323 | 47,227 | 4,493 | 55,437 |
| Heeger | 83,655 | 3,997 | 48,651 | 4,766 | 81,866 |
| Shizawa & Mase | 47,542 | 4,800 | 43,743 | 3,553 | 84,684 |
| Fleet & Jepson | 61,576 | 4,373 | 45,775 | 3,132 | 90,975 |
| Sun ve diğ. | 41,244 | 4,030 | 49,683 | 4,728 | 55,008 |

Sonuçlara göre, Horn & Schunck yönteminin daha yoğun sonuç verdiği, Sun ve diğ. Yönteminin ise en seyrek sonuçları verdiği görülmektedir. Açısal hata ortalamasında ise Shizawa & Mase'nin daha iyi, Sun ve diğ. ve Lucas & Kanade'nda kötü sonuçlar vermediği görülmektedir. Akış bitişi noktası ortalaması değerleri Lucas & Kanade'nı en iyi, Uras ve diğ.'nin ise yeterli olabileceği değerlendirilmektedir. Standart sapmaların tüm dizilerde neredeyse aynı olduğu, aralarında çok belirgin farkların bulunmadığı görülmektedir. Sonuçlara göre bir ağacın kayan görüntü dizisi için değerlendirme çizelgesine göre en iyi sonuçları Horn & Schunck ve Lucas & Kanade yöntemlerinden elde edildiği görülmektedir.

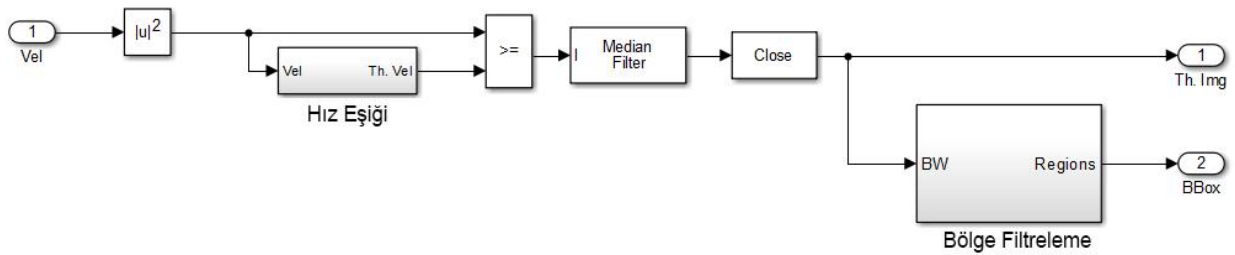
3. MATLAB SİMULİNK UYGULAMASI (MATLAB SIMULINK APPLICATION)

MATLAB özellikle mühendislik alanında en çok yararlanılan programlardan biri [35]'dir. Simulink, ise MATLAB ile bütünleşik olarak çalışan görsel benzetim ortamıdır. MATLAB Simulink, çok zengin bir blok kütüphanesi barındırmaktadır ayrıca sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemleri içeren hibrit sistemleri desteklemektedir. Benzetimi yapılmak istenen sistem, bu blokları sürükle-bırak yöntemiyle çok kolay bir şekilde kısa sürede kurulabilmektedir. MATLAB Simulink ortamında geliştirilmiş "Optik Akış Kullanarak Otomobil Takip Etme" uygulamasına ait bir Simulink modeli Şekil 9'da verilmiştir.



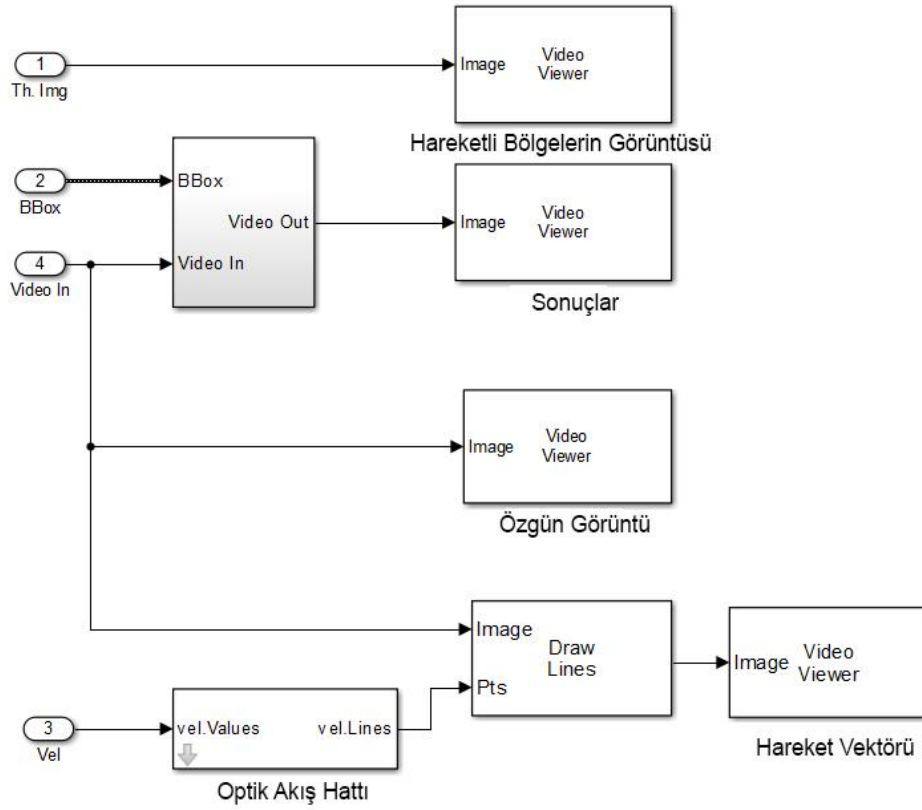
Şekil 9. Optik Akış Kullanarak Otomobil Takip Etme uygulamasına ait bir Simulink modeli (Figure 9 A Simulink model of Automobile Tracking Using Optical Flow)

Şekil 9'da bulunan Hareketli Bölgelerin Saptanması Bloku Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Hareketli Bölgelerin Saptanması Bloku Simulink modeli (Figure 10 Simulink model of the Detection of Movable Zones Block)

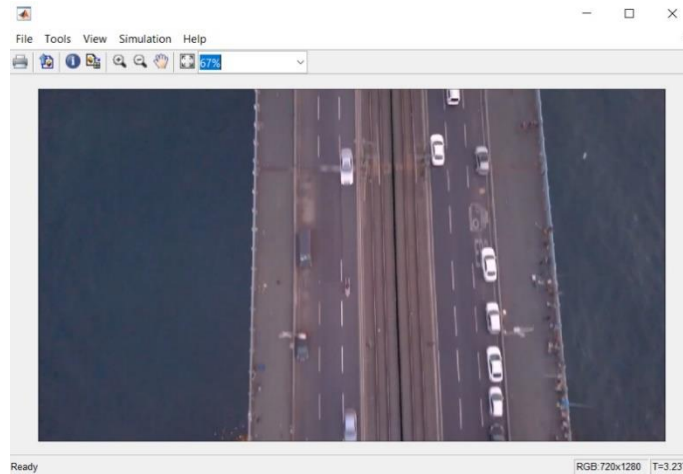
Şekil 9'da gösterilen Sonuçlar Bloku Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11. Sonuçlar Bloku'nun Simulink modeli (Figure 11 Simulink model of Results Block)

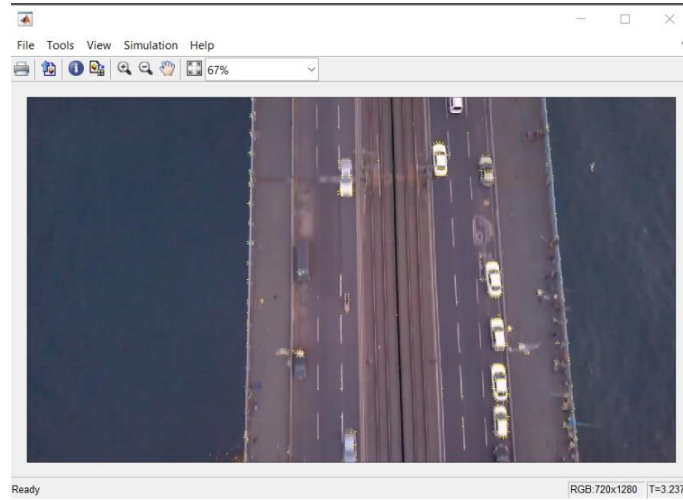
Şekillerden de görüldüğü gibi Simulink modeli temel olarak “Hareketli Nesnelere Bulma” ve “Nesne Sınır Kutusu Belirleme” olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Hareketli Nesnelere Bulmak için, Simulink'teki optik akış bloğu kullanılmaktadır. Optik akış bloğu, görüntü yoğunluğu değerini okumakta ve optik akış yöntemlerinden birini kullanarak hareketli nesnelere bulmaktadır. Hareketli nesneyi görüntünün arka planından ayırdıktan sonra, nesne için sınır kutusunu ve karşılık gelen kutu alanını elde etmek için blob analiz bloğundan yararlanılmaktadır. Burada sadece belirli bir boyuttan daha büyük olan sınır kutuları görüntülenmektedir. Kutunun boyutları izlenecek nesneye göre belirlenmektedir.

Şekiller 12-15'te Optik Akış Kullanarak Otomobil Takip uygulamasının benzetim sonuçları verilmiştir. Simulink modelinde diğer Optik Akış yöntemleri de bulunmasına rağmen Şekillerde gösterilen sonuçlar sadece Horn Schunck yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Şekiller, video 3,237'ci saniyede iken modelin çalışması dondurularak alınmıştır. Şekil 12'de 3,237'ci saniyedeki özgün görüntü görülmektedir.



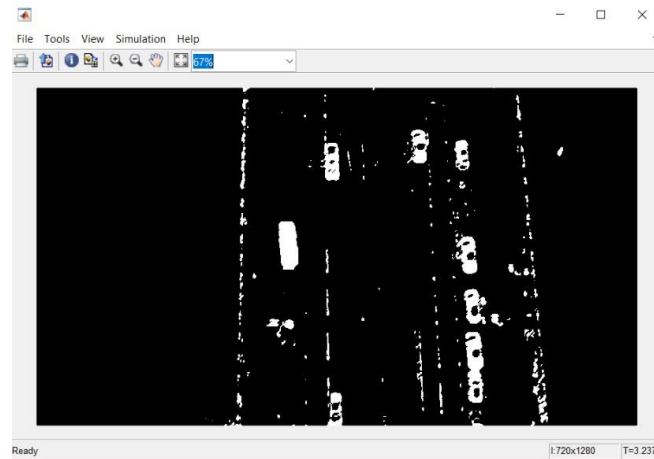
Şekil 12. Özgün görüntü (Figure 12 Original image)

Şekil 13'de 3,237'ci saniyedeki hareketli araçların vektörel yön ve hızları görülmektedir.



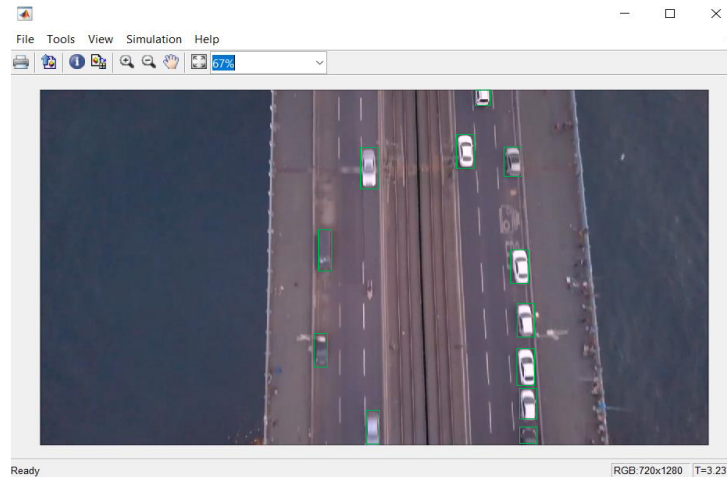
Şekil 13. Hareketli araçların vektörel yön ve hızları (Figure 13 Vector directions and speeds of moving vehicles)

Şekil 14'te 3,237'ci saniyedeki hareketli araçların ikili sayı özellik görüntüleri görülmektedir.



Şekil 14. Hareketli araçların ikili sayı özellik görüntüleri (Figure 14 Binary number property images of moving vehicles)

Şekil 15'te 3,237'ci saniyedeki hareketli araçlar çerçeve içinde görülmektedir.



Şekil 15. Hareketli araçlar (Figure 15 Moving vehicles)

4. İNSANSIZ HAVA ARACI SİSTEMİNİN YAZILIM VE DONANIMI (UNMANNED AERIAL VEHICLE SYSTEM SOFTWARE AND HARDWARE)

Bu bölümde, bir İHA genel sistemin ve alt sistemlerin için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri verilmiştir.

4.1 İnsansız Hava Aracı (Unmanned Aerial Vehicle)

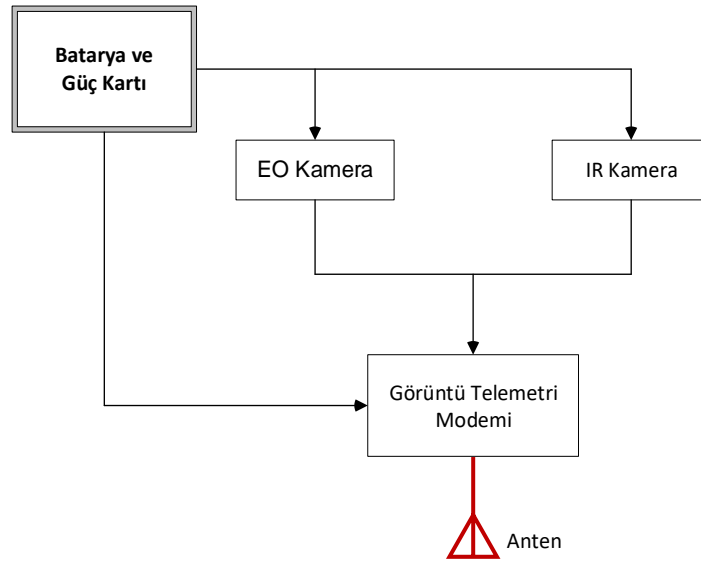
Bu makalede İHA olarak bir dörütuçar gerçekleştirilerek testlerde kullanılmıştır. Dörütuçarlar, 6 serbestlik derecesinde hareket edebilmektedirler [36, 37]. Bu hareket serbestlikleri sadece dörütuçarın dört motorunun hızı olmak üzere 4 denetim girişi vardır. Dörütuçarlar, durumlarını değiştirmeden dikey z ekseninde hareket ederken, yatay x ve y eksenlerinde hareket edebilmelidirler. Sadece 4 denetim girişi ile 6 serbestlik derecesini denetlemek mümkün olmadığından, istenen x, y, z konumlarına ve istenen bir istikamete uçurabilmek için denetleyiciler tasarlanmalıdır. Sapma ve yalpa açıları korunurken, dörütuçar yunuslama yapabilmelidir. Şekil 16’da gerçekleştirilen dörütuçar görölmektedir.



Şekil 16. Gerçekleştirilen dörütuçar (Figure 16 Built quadrotor)

4.2 Faydalı Yük (Payload)

İnsansız hava araçlarının gerçekleştirilmek istenilen görev kapsamında gövdesinde taşıdığı ekipmanlardır. Faydalı yük kamera, telemetri sistemleri, mühimmat, SAR gibi uçuş görevinin gerçekleştirilmesine yönelik ihtiyaç duyulan birçok farklı araç ve sistem olarak insansız hava araçlarında bulunabilmektedir. Şekil 17’de faydalı yükün işlevsel yapısı gösterilmiştir.



Şekil 17. Faydalı yükün işlevsel yapısı (Figure 17 Functional structure of the payload)

4.3 MATLAB Grafiksel Kullanıcı Arayüzü Tabanlı Uygulama (MATLAB Graphical User Interface Based Application)

Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface (GUI)) [38], kullanıcıların elektronik cihazlarla görsel gösterge temsilleri aracılığıyla etkileşime girdiği bir tür grafiksel kullanıcı arayüzüdür. Bu makalede bir İHA 'nın kamerasından alınan görüntülerden Optik Akış yöntemi ile hareketli nesnelere tespit ve takip etmek için MATLAB Grafiksel Kullanıcı Arayüzü ortamında bir uygulama yazılmıştır. Şekil 18'de GUI arayüzü görülmektedir.

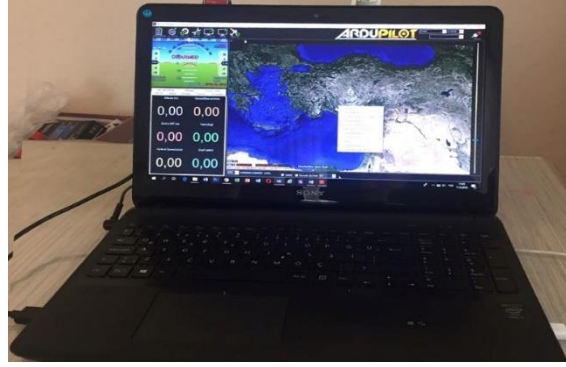


Şekil 18. Hareketli nesne tespiti ve takibi için geliştirilen MATLAB GUI arayüzü (Figure 18 MATLAB GUI interface for moving object detection and tracking)

Şekil 18'de görülen GUI olay tabanlı programlandığı için arayüzde bulunan kameranın çalıştırılması, görüntü aktarımı ve Optik Akış gibi her bir nesne için programlama dosyasında callback olarak adlandırılmış olan birçok ayrı alt rutin programlama parçaları bulunmaktadır. Bu tür programlamada MATLAB GUI hem bir arayüz olarak çalışmakta hem de her bir olaya ait alt program parçalarını birbirinden bağımsız olarak çalıştırmaktadır.

Yer kontrol istasyonu (Ground control station)

Yer kontrol istasyonu, insansız hava araçlarını denetlemek için kullanılan sistemlerdir. Yer kontrol istasyonu ile uçuş sırasında uçuş süresi, batarya durumu, pozisyonu gibi insansız hava aracı tarafından hayati önem taşıyan verilerin anlık takibi yapılmaktadır. Ayrıca altlık harita üzerinden insansız hava aracının mevcut konumu gözlemlenebilmekte böylece uçuş öncesinde otonom veya manuel olarak güzergah oluşturulabilmekte, hava aracı ile çekilen fotoğraflar düzenlenebilmekte, koordinat bilgileri kaydedilebilmektedir. Bu çalışmada ücretsiz açık kaynak kodlu Mission Planner [39] yer kontrol istasyonu yazılımı kullanılmıştır. Şekil 19'da bu çalışmada kullanılan yer kontrol istasyonu görülmektedir.



Şekil 19. Gerçekleştirilen yer kontrol istasyonu (Figure 19 Built ground control station)

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede, bir İHA'nın kameralarından alınan anlık görüntülerden hareketli nesnelerin gerçek zamanlı olarak tespit ve takip edilmesi MATLAB ortamında geliştirilen Optik Akış yöntemlerinin kullanıldığı bir yazılım ile yapılmıştır. En uygun Optik Akış algoritmasının seçilebilmesi için Optik Akış yöntemlerinde kullanılan fark, alan, enerji ve faz tabanlı yöntemler MATLAB ortamında test edilerek, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her bir yöntem "Bir Ağacın Kayan Görüntü Dizisi" kullanılarak sınanmıştır. İHA'nın kamerasından alınan görüntülerden Optik Akış yöntemi ile hareketli nesnelere tespit ve takip etmek için MATLAB GUI Arayüzü ortamında bir uygulama yazılmıştır. Bu yazılım gerçekleştirilen bir dörtüçerle uygulanarak optik akış yöntemi ile gerçek zamanlı deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, bir İHA'nın kameralarından elde edilen anlık görüntülerin tespitinde en başarılı yöntemin Horn Schunck optik akış yöntemi olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca çalışmada bir İHA genel sistemin ve alt sistemlerin için gerekli olan donanım ve yazılım mimarileri ile Hareketli nesne tespiti ve takibi için geliştirilen MATLAB GUI arayüzü ortamında yazılan uygulama paylaşılmıştır ve test edilmiştir. Kameralardan alınan anlık görüntüde hareketli nesnenin tespitinin uygulama ile gerçekleşebileceği görülmüştür. Sonraki çalışmalarda hareketli nesnelerin takibinde yapay zekâ algoritmalarının da kullanılabilmesi ve MATLAB Simulink ile birlikte farklı simülasyon ortamları da kullanılarak sonuçların değerlendirilebileceği önerilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, "Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri" tarafından 07/2017-02 kodu ile desteklen, "Bir İnsansız Hava Aracı Gerçekleştirme Ve Hareketli Nesnelerin Tespit Ve Takibinde Kullanımı" adlı tezden çıkarılmıştır. Yazarlar, destekleri için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri'ne teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. Karaağaç, "İHA Sistemleri Yol Haritası Geleceğin Hava Kuvvetleri 2016-2050", STM, 2016.
- [2] "Türkiye İnsansız Hava Aracı Sistemleri Yol Haritası", Savunma Sanayi Müsteşarlığı, (2011).
- [3] R. Cömert, U. Avdan, ve E. Şenkal, "İnsansız hava araçlarının kullanım alanları ve gelecekteki beklentiler", IV. Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Sempozyumu, BEÜ, Zonguldak, 2012.
- [4] G.R. Rodríguez-Canosa, S.J. Thomas, J. del Cerro, A.Barrientosand B.A.MacDonald, "A Real-Time Method to Detect and Track Moving Objects (DATMO) from Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Using a Single Camera", Remote Sensing, 4(4), 1090-1111, 2012.
- [5] K. Güllü, "Bilgisayarla Görüye Giriş, Ders 8 – Optik Akış (Optical Flow)", Ders Notu, Kocaeli Üniversitesi, 2017.

- [6] R. Malhotra, "Detection and Segmentation Of Moving Objects In Video Using Optical Vector Flow Estimation", Master Of Science, University Of Saskatchewan, Saskatchewan, 2008.
- [7] C.R. del-Blanco, F. Jaureguizar and N. García, "An Efficient Multiple Object Detection and Tracking Framework for Automatic Counting and Video Surveillance Applications", *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 58, 3, 2012.
- [8] A. Roy, S. Shindeandand. K.D. Kang, "An Approach for Efficient Real Time Moving Object Detection", *Ecological Society of America ESA- Annual Meeting*, 2010.
- [9] A.F.M.S. Saif, A.S. Prabuwoand Z.R. Mahayuddin, "Moving Object Detection Using Dynamic Motion Modelling from UAV Aerial Images", *The Scientific World Journal*, 2014, 890619, 2014.
- [10] M. Yazdiand and T. Bouwmans, "New Trends on Moving Object Detection in Video Images Captured by a moving Camera: A Survey", *Computer Science Review*. 28, 157–177, 2018.
- [11] A.H. Açarçipek, "Horn ve Schunck Optik Akış yöntemi ile hareket vektörlerinin gerçek zamanlı veya videolar üzerinden gerçekleşmesi (Matlab)", *Sayısal İşaret İşleme Tasarım ve Uygulama Ders Notu*, No: 040100487, 2017.
- [12] S.G. Ebrahimi, "Shadow Aware Object Detection And Vehicle Identification Via License Plate Recognition", *Degree of Master of Science, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, North Cyprus*, 1-6, 200).
- [13] B. Gökçe, G. Sonugür, "GPS destekli imge çakıştırma yöntemi ile hareketli nesnelerin tespiti", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(5), 353-360, 2016.
- [14] L.W.X. Cejnog, "Implementation and Evaluation of Differential Optical Flow Methods", *Unpublished Thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciencias Exatas*, 2013.
- [15] B.B. Örtten, "Moving Object Identification And Event Recognition In Video Surveillance Systems", *Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 2005.
- [16] E. Özüntürk, "Optik Akış ile Hareket Tespiti", *Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 2007.
- [17] O. Şencan, "Otonom Mobil Robotlarda Optik Akış Tabanlı Görsel Eş Zamanlı Lokalizasyon ve Haritalama", *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2010.
- [18] M.F. Talu, "Nesne takip yöntemlerinin sınıflandırması", *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(18), 45-63, 2010.
- [19] M.S. Temiz, "Video Görüntülerinden Hareketli Nesnelerin Çıkarılması ve Hareket Yörüngelerinin Belirlenmesi", *Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.
- [20] J.L.Barron, D.Fleet and S.Beauchemin, "Performance of optical flow techniques", *International Journal of Computer Vision*, 12(1), 43–77, 1994. DOI: 10.1007/BF01420984).
- [21] Thacker, N. A., Clark, A. F. Barron, J.L. and Ross Beveridge, J., Courtney, P., Crum, W. R., Ramesh, V., and Clark, C. (2008). Performance characterization in computer vision: A guide to best practices, *Computer Vision and Image Understanding*, 109(3), 305 - 334.
- [22] İnternet: Raudies, F. (2013) Optic flow. Scholarpedia, 8(7), 30724 http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.scholarpedia.org%2Farticle%2FOptic_flow%23Definitions_of_optic_flow&date=2018-12-25. Son Erişim Tarihi: 24.08.2018.

- [23] E. Özüntürk, “Optik Akışla Hareket Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2017].
- [24] B.K.P. Horn and B.G. Schunck, “Determining optical flow”, *Artificial Intelligence*, 17, 185-203, 1981.
- [25] B.D. Lucas and T.Kanade, “An iterative image registration technique with and application to stereo vision”, In *Proceedings of Imaging Understanding Workshop*, 121-130, 1981.
- [26] H.H. Nagel, “On the estimation of optical flow: relations between different approaches and some new results”, *Artificial Intelligence* 33, 299-324, 1987.
- [27] S. Uras, F. Girosi, A. Verri and V.T orre, “A computational approach to motion perception”, *Biological Cybernetics*, 60, 79-87, 1988.
- [28] P. Anandan, “A computational framework and an algorithm for measurement of visual motion”, *International Journal of Computer Vision*, 2:283-310, 1989.
- [29] J.J. Little, H.H. Bulthoff and T.A. Poggio, “Parallel optical flow using local voting”, In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Vision*, Tampa, 454-459, 1988.
- [30] D.J. Heeger, “Optical flow using spatiotemporal filters”, *International Journal of Computer Vision*, 1(4), 279-302, 1988.
- [31] M. Shizawa and K. Mase, “A unified computational theory for motion transparency and motion boundaries based on eigenenergy analysis”, In *Proceedings of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference CVPR'91*, 289-295, 1991.
- [32] D. Fleet and A.D. Jepson, “Computation of component image velocity from local phase information”, *International Journal of Computer Vision*, 5(1), 77-104, 1990.
- [33] D. Sun, S. Rothand and M.J. Black, “Secrets of optic flow estimation and their principles”, In *Proc. of Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) San Francisco*, 2432-2439, 2010.
- [34] İnternet: Raudies. F., Optic Flow Estimation. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fgithub.com%2Ffraudies%2Foptic-flow-estimation+&date=2018-12-26>. Son Erişim Tarihi: 24.08.2018.
- [35] İnternet: Matlab. URL: <https://www.mathworks.com/> Son Erişim Tarihi: 24.09.2022.
- [36] İnternet: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.aliexpress.com%2Fitem%2FDIY-Full-Set-2-4GHz-4-Aixs-Quadcopter-RC-Drone-630mm-Frame-Kit-MINI-PIX-GPS%2F32851262028.html%3Fspm%3Da2g0s.9042311.0.0.4f4d4c4dzEybRq+&date=2018-12-25>. [Son Erişim Tarihi: 24.08.2018].
- [37] İnternet: <http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fdevelopers.google.com%2Fmaps%2Fdocumentation%2F+&date=2018-12-25>. [Son Erişim Tarihi: 24.08.2018].
- [38] İnternet: MATLAB GUI URL: <https://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html> Son Erişim Tarihi: 24.09.2022.
- [39] İnternet: Ardupilot URL: <https://ardupilot.org/planner/> Son Erişim Tarihi: 24.09.2022.



Attentive Sequential Auto-Encoding Towards Unsupervised Object-centric Scene Modeling

Yarkın Deniz ÇETİN¹ Ramazan Gökberk CİNBIŞ^{2,*}

¹*I.D. Bilkent University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Ankara, Turkey*

²*Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Computer Engineering, Ankara, Turkey*

Article Info

Research article
Received: 02.07.2022
Revision: 18.10.2022
Accepted: 15.11.2022

Keywords

Virtual MCA
Real MCA
Pulse Processing

Abstract

This paper describes an unsupervised sequential auto-encoding model targeting multi-object scenes. The proposed model uses an attention-based formulation, with reconstruction-driven losses. The main model relies on iteratively writing regions onto a canvas, in a differentiable manner. To enforce attention to objects and/or parts, the model uses a convolutional localization network, a region level bottleneck auto-encoder and a loss term that encourages reconstruction within a limited number of iterations. An extended version of the model incorporates a background modeling component that aims at handling scenes with complex backgrounds. The model is evaluated on two separate datasets: a synthetic dataset that is constructed by composing MNIST digit instances together, and the MS-COCO dataset. The model achieves high reconstruction ability on MNIST based scenes. The extended model shows promising results on the complex and challenging MS-COCO scenes.

1. INTRODUCTION

Generative image modeling is a fundamental problem in machine learning, with numerous potential applications in various domains, such as computational art generation, image editing, representation learning and unsupervised recognition. For this reason, a variety of models have been proposed over the recent years, such as Generative Adversarial Networks (GANs) [1-3], variational auto-encoders (VAEs) [4-5], Moment Matching Networks [6], Normalizing Flows [7-11], Diffusion Models [12-13,34-35] and auto-regressive models [36].

Recent progress in generative model architectures and formulations has led to the construction of high-fidelity and high-resolution generative image models, e.g., Liu et al. [14], Brock et al. [15], Karras et al. [16], Karnewar and Wang [17], Karras et al. [18], Gu et al. [31], Rombach et al. [32], Zhang et al. [33]. These models are known to yield particularly successful results in single-object cases, such face generation [37]. However, even with the state-of-the-art techniques, the contemporary models suffer from two shortcomings: (i) the best performing models rely on supervised training where image labels and/or annotations are provided to the model during training [19], (ii) the modeling of complex scenes, involving multiple objects is largely an unresolved problem [20].

In this context, we propose a sequential image auto-encoder that can be trained over multi-object scene examples without annotations. The main goal of the proposed model is to learn a re-constructive operator that discovers object parts, objects and/or distinctive regions in an unsupervised manner, such that a scene can be reconstructed in a limited number of generation steps.

The proposed approach aims to make a step towards building models that can ultimately learn the structure of the world, in an object-centric way, from unlabeled natural images, as a way to tackle the difficulty of modeling complex scenes. In particular, the long-term research goal is to develop modeling principles that

allow handling complex scenes in an object-by-object manner so that contemporary models performing well in single-object domains can be made to work well in the complex ones.

A main observation that suggests the possibility of unsupervised learning of object-based sequential scene models is the fact that modeling complex scenes in an object and/or part driven can be of lower complexity, compared to learning unstructured scene models, especially under certain constraints. The main reason here is that the spatial arrangement of objects within a scene typically has much more variability compared to the variability within the spatial structure of the object parts. For example, in a street scene, cars, people, trees and buildings may appear in pretty much arbitrary positions within the limits of geometric layout, with various nearby occurrences of the parts of different objects. In contrast, cars (and most other objects) have a relatively more rigid structure that depicts far smaller spatial variability, especially when the pose-driven variations are ignored. Therefore, from a complexity point of view, object-aware models are likely to provide much more scalable approaches, as opposed to tackling complete scenes as complex spatial arrangements of low-level patches.

Based on these reasonings, we therefore aim to make a step towards building unsupervised models that handle scenes in an object-by-object manner. More specifically, we aim to learn sequential auto-encoding processes where each write operation focuses on a single object, or a part of it, as opposed to writing patches with mixed object semantics. Ultimately, the goal is to construct approaches that are naturally capable of modeling natural scenes through object compositions, towards overcoming the limitations of contemporary models.

A major inspiration for our work is the DRAW model [21]. The DRAW model uses a variational auto-encoder where both the encoder and decoder components are recurrent neural networks (RNNs). At each time step, DRAW uses the output of the decoder RNN to decide the next image area to be read and written. The encoder RNN is updated according to the read area, its output is transformed into a latent variable sample, and the decoder RNN is updated according to that sample information. The patch to be written on the canvas, i.e., the image being constructed, is also decided using the output of the decoder RNN. The original DRAW work does not directly aim at learning object-based image models, e.g., the proposed model uses 64 read & write operations on simple MNIST images, which contain one object per image [21].

Our approach similarly proposes a sequential auto-encoder. In contrast to DRAW, however, we explicitly target exploring the potential of learning an objects-driven auto-encoder. Therefore, other than embracing the fully-differentiable read and write operators, and the sequential canvas-writing framework of DRAW, our approach drastically differs from the original DRAW model to be able to enforce object-by-object reconstruction of the scenes. The main distinctions of our model can be summarized as follows. First, instead of relying on RNN outputs to decide the soft attention areas as in DRAW, we define a dedicated convolutional localization network that decides on the read and write region coordinates at each time step. Second, instead of relying on RNNs, we define a bottleneck-limited region auto-encoder that operates locally on the area soft-attended according to the localization network output. The bottleneck in the encoding dimensionality restricts the model's per-patch generative complexity capacity, therefore, effectively enforces the whole model to focus on individual objects or their parts, as opposed to learning a degenerate generation process, e.g. holistically autoencoding the full scene like a conventional auto-encoder. Third, we propose the mean-squared error over time (MSEOT) loss, which increasingly penalizes discrepancies between the canvas and the original image. MSEOT term effectively enforces the network to reconstruct the scene in a minimal number of steps, and therefore, encourages learning to attend to object or major part patches, instead of smaller fragments. Fourth, we introduce an additional patch loss that directly measures the autoencoding quality of individual write operations. Finally, towards handling models with complex backgrounds, we introduce the background model, which first generates the background "stuff" so that the sequential model can focus on generating foreground "things".

The details of the method are given in Section 2. The experimental observations, which demonstrate the potential of the proposed approach in learning object-driven auto-encoding processes, are presented and discussed in Section 3. Finally, the conclusive remarks are given in Section 4.

2. METHOD

In this section, we present the details of the proposed model. We first give an overview of the overall architecture in Section 2.1. We then explain the localization network, region auto-encoder and differentiable reader/writer in Section 2.2, 2.3 and 2.4, respectively. We explain the training details in Section 2.5. Finally, we present model extensions towards handling scenes with complex backgrounds in Section 2.6.

2.1. Main Architecture

The architecture is built in a sequential way to reconstruct the given scene, within a limited number of steps. At each step, the model localizes the region to be read, extracts a summary of the location, re-constructs the localized region and accumulates the region reconstructions by writing onto a canvas.

More formally, the model can be expressed in terms of a series of sub-models, operations, and (intermediate) variables. The canvas image, which is updated over the read-write iterations, is expressed by c . The status of the canvas at a particular iteration t , is given by c_t , which is normally empty at $t = 0$ unless initialized by a background model (Section 2.6). At the beginning of each iteration, we first compute the error image ξ_t between the input image x , and the current canvas:

$$\xi_t = x - c_t \quad (1)$$

The next step of the model is to localize the region, where the model will soft-attend in the current iteration, using the localization network:

$$\omega_t = \text{Localize}(\xi_t) \quad (2)$$

The output of the localization network (Section 2.2) provides the parameters ω of the soft attention reader-writer (Section 2.4).

The next step is to read and encode the current region of interest in the error image domain:

$$\rho_t, f_t = \text{Read}(\xi_t, \omega_t) \quad (3)$$

$$z_t = \text{Encoder}(\rho_t) \quad (4)$$

The reader takes the error image ξ_t and the coordinates ω_t , and returns the read patch ρ_t and region reading filters f_t , which are re-used later in the writing stage. The encoder takes the read patch and returns the patch encoding z_t .

Once the localization, reading, and encoding steps are completed, the decoder sub-module takes the encoding z_t and synthesizes the region image to be written onto the canvas:

$$r_t = \text{Decoder}(z_t) \quad (5)$$

where r_t is the reconstruction output. The canvas is updated additively via the writing operation:

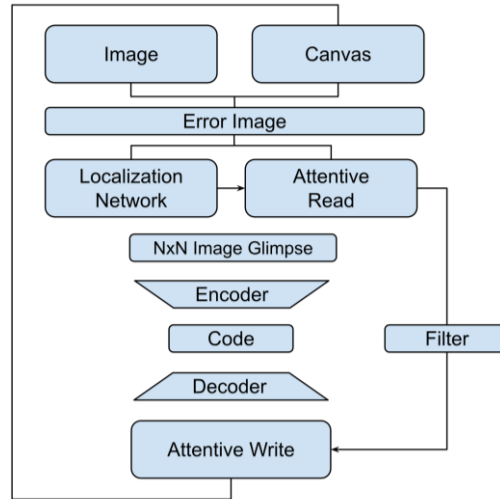


Figure 1. The proposed sequential generation approach. The model iteratively attends to an image region, reconstructs the corresponding patch, and writes onto the canvas. All steps and modules are learned in an unsupervised manner.

$$c_{t+1} = c_t + Write(r_t, f_t) \quad (6)$$

It is worth nothing that the same filters created at the reading stage are re-used here. A summary of all these steps is summarized in the diagram given in Figure 1. Overall, the model aims to reconstruct a given scene by attentively reading, reconstructing and writing patches onto a canvas.

The model's temporal depth is specified by the number of iteration (T), a hyper-parameter that describes the number of steps it is allowed to make to reconstruct the image. While this is normally a hyper-parameter, in Section 2.5 we describe a technique that aims to enforce the network to learn reconstruction with a limited number of iterations so as to learn larger parts or objects, instead of non-semantic low-level patches.

The following subsections explain the details of the aforementioned submodules and operations.

2.2. Localization Network

The localization network takes a given error image ξ_t at each iteration t , and returns the parameters for the patch reading operator. For this purpose, we use a convolutional neural network (CNN) that aims to predict the image region that needs to be locally updated. The network, as shown in Figure 2, is composed of a series of convolution and max pooling operations, with ReLU activations. While the convolutional layers are aimed at coarsely preserving the spatial structure of the input, max pooling operations aim to progressively select a particular image region.

The final layer of the network takes the vectorized convolutional activations, transforms them via a fully connected layer and outputs the 5 parameters required by the attentive read/write operators, as explained later in Section 2.4.

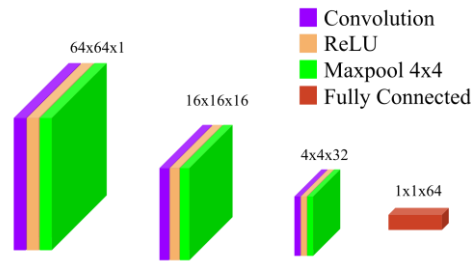


Figure 2. The localization network used in the main experiments. This particular network shown is designed for 64x64 input images. The architecture can easily be adapted to other input resolutions.

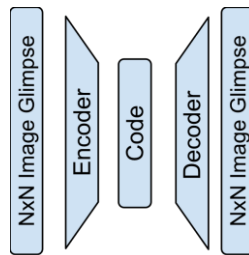


Figure 3. Auto-encoder network with the bottleneck layer in the middle for reconstructing local image regions.

2.3. Region Auto-Encoder

At each step, the localized region is encoded and reconstructed via a network with restricted encoding capacity, which we call region auto-encoder. The overall structure is visualized in Figure 3: the module takes a localized image region, encodes into a limited dimensionality code and tries to reconstruct the region of the same size as in input.

The bottleneck dimensionality can affect the learned region patterns. Larger dimensionalities can lead to localization of large regions, while the smaller ones can cause learning spatially too small patterns.

The region auto-encoder architecture used in our experiments is defined in Table 1. The encoder starts with three convolutional layers. The convolutional features are flattened and transformed via two consecutive fully connected layers. The bottleneck dimensionality is set to 1024 based on preliminary experiments. The encoded vector is approximately transformed back to the region via three consecutive transposed convolution layers.

2.4 Soft-Attention Reader-Writer

For attentive image reading and canvas writing operations, we utilize the kernel-based formulation used in Gregor et al. [21]. In this approach, $N \times N$ grids of Gaussian kernels are used for reading & writing image regions. The grid is defined by the stride parameter δ and the overall grid center coordinates (g_x, g_y) . The center μ of the (i, j) -th grid cell is defined as in Eq. 7, and Eq. 8:

Table 1. Architecture of the region auto-encoder.

| Autoencoder Network | |
|---------------------|-------------------|
| Layer | Output Size |
| Convolution 1 | 16 x 16 x 16 |
| Convolution 2 | 32 x 8 x 8 |
| Convolution 3 | 64 x 4 x 4 |
| Fully Connected | 64, 128, 256, 512 |
| Fully Connected | 1024 |
| Transpose Conv. 1 | 32 x 8 x 8 |
| Transpose Conv. 2 | 16 x 16 x 16 |
| Transpose Conv. 3 | 1 x 32 x 32 |

$$\mu_x^i = g_x + \left(i - \frac{N}{2} - 0.5\right) \delta \quad (7)$$

$$\mu_y^j = g_y + \left(j - \frac{N}{2} - 0.5\right) \delta \quad (8)$$

Given the grid configuration specified by all μ_x, μ_y values and the kernel variance parameter σ , a set of Gaussian kernels are formed. The gaussian kernels corresponding to the (i, j) -th grid cell using the corresponding grid center μ and σ values are defined as follows:

$$F_x(i, a) = \frac{1}{Z_x} \exp\left(-\frac{(a - \mu_x^i)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (9)$$

$$F_y(j, b) = \frac{1}{Z_y} \exp\left(-\frac{(b - \mu_y^j)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (10)$$

where F_x and F_y are the Gaussian kernel functions in the x and y directions, respectively. More specifically, $F_x[i, a]$ gives the reading (or writing) weight of pixels with $x = a$, for all cells in the i -th row of the grid. Similarly, $F_y[j, b]$ gives the reading (or writing) weight of pixels with $y = b$, for all cells in the j -th column of the grid. Z_x and Z_y are normalization constants such that the kernel weights sum to one.

A final input parameter γ is used for scaling the read and write operation intensity values. The reading is achieved simply by a bilinear operation. For an input x , the value read for the grid coordinate (i, j) is given by:

$$\sum_a^H \sum_b^W \gamma F_x(i, a) F_y(j, b) x(a, b) \quad (11)$$

where $x(a, b)$ is the image pixel at the coordinates (a, b) , and the summation runs over all image pixels. Similarly, the write operation produces the image to be added to the canvas according to the following formula, describing the write value for pixel at the grid coordinate (i, j) :

$$\sum_a^H \sum_b^W \frac{1}{\gamma} F_x(i, a) F_y(j, b) x(a, b) \quad (12)$$

In color images, we apply the same operations to all channels individually.

Examples of kernels with different stride δ and the number of kernel settings are shown in Figure 4. The first column shows the original images. The second one shows outputs of patch read operations via Gaussian kernels. The third column shows the images rewritten onto the canvas, and the last one shows the filters and their respective densities over the canvas. Going from up to down, the number Gaussian kernels (N) and their σ parameters are as follows. First row: $N = 21, \sigma = 0.1$. The second row: $N = 42, \sigma = 0.1$. The third row: $N = 21, \sigma = 0.01$. The last row: $N = 42, \sigma = 0.01$. Notice that higher σ values yield more blurry readings, and the larger number of kernels provide higher resolution operations. Therefore, in practice, the stride δ parameter controls the size of the region that is read by the model, and by increasing δ , larger areas can be read at the expense of reduced resolution. The resolution, in general, can be adjusted by decreasing or increasing the number of kernels.

The Gaussian kernel based read/write scheme has two main advantages. First, the operation is fully differentiable, therefore, allows end-to-end gradient-based training. Second, using only 5 parameters, i.e., g_x, g_y, δ, σ and γ , the read and write operation is determined, which simplifies the task of the localization model.

2.5. Training

Arguably the most commonly used loss function for training auto-encoders is the mean squared error (MSE) loss, which is defined as follows:

$$\frac{1}{HW} \sum_i^H \sum_j^W (x_{ij} - c_{ij})^2 \quad (13)$$

While this is a sensible loss for measuring the overall reconstruction quality, a problem that we have observed is that the network may end up writing too many small patches especially when the number of read/write iterations is set to high. Similarly, when the iteration count is too small, the network then struggles learning the scene structures as it is not allowed to make sufficiently many changes on the canvas for reconstruction purposes.

A major difficulty in setting the optimal number of read/write iterations is the fact that complexity of the scenes can change significantly across images. A parameter that is too small for one scene can be too high for another one. Based on these observations, we opt to choose a relatively large number of iterations while penalizing more heavily the canvas errors towards the end. More specifically, we propose the *Mean Squared Error Over Time* (MSEOT) loss, which has the following form:

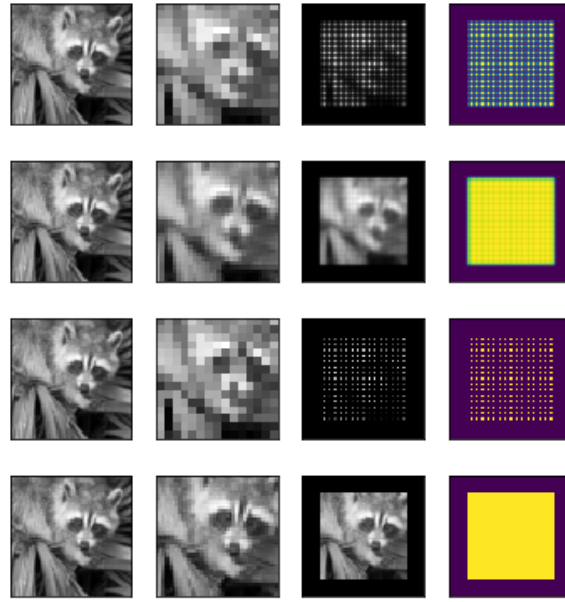


Figure 4. Visualization of soft attention readers with varying number of kernel and stride parameters.

$$L_{MSEOT} = \sum_{t=1}^T ||x - c_t||^2 (t - 1)^2 \quad (14)$$

This loss term encourages the network to complete the scene in early iterations. In this manner, whenever reconstruction is possible with a few write operations, e.g., in scenes with few objects in them, the network will be rewarded for early reconstruction. However, where that is not possible, e.g., in relatively more complex scenes, the network may continue to write patches towards maintaining a smaller reconstruction loss at least towards the final iterations.

The proposed MSEOT loss measures the loss over the whole image. However, it is also preferable to write accurate regions so that each write corresponds to the whole object (or part) as opposed to an intensity-scaled version of it. To realize this loss term (L_{region}), at each iteration, we apply the read operation to the original image, and compute the MSE loss between the write output and the original patch.

Our final loss blends all these losses together, which are computed on a per-iteration basis:

$$L_{total} = \alpha_{region} L_{region} + \alpha_{MSEOT} L_{MSEOT} \quad (15)$$

where α_{region} and α_{MSEOT} are the weighting terms. The accumulation of these losses over the iterations are used to drive the network training.

2.6. Handling Scenes with Complex Backgrounds

This section explains the background module that we introduce to the model in order to adapt it from scenes with simple backgrounds (i.e., compositions of binary digits) to more complex, realistic scenes as in the MS-COCO [22] dataset. We also greatly increase the localization network's complexity to improve its modeling capacity and utilize progressive training, both of which are explained at the end of section.

Background modeling. One of the problems with the attentive model is the limited number of write operations the model has in its disposal to reconstruct a given image. On top of that, forcing the model to behave in a one-object-at-a-time behavior via MSEOT and all the explained design choices creates a great difficulty in scenes with complex backgrounds.

Since the non-trivial backgrounds are generally composed of *stuff*, which is typically a combination of countless objects and/or textures of trees, grasses, etc. Such objects are not compatible with the *one object (part) at a time* auto-encoding scheme.

In fact, when the original model is trained over images with non-trivial background, the model allocates a great number of write operations to writing stuff fragments, since the background is generally the largest "object" and typically constitutes the largest part of the reconstruction error.

This behavior leads to undesired one to one copying of unstructured patches, without showing any scene structure learning behavior. To prevent learning such degenerate models, we introduce a *background network*. Basically, the background network $B(x)$ is a simple, image-level bottleneck autoencoder that aims to capture the coarse scene structure.

This background network reduces the initial error of the canvas, allowing the model to start with a coarse scene, as opposed to an empty canvas. With the help of this network, the model starts to show promising results MS-COCO, which are later discussed in Section 3.

Table 2 presents the architectural details of the background network. Its encoder consists of a simple convolutional layer, followed by a fully connected layer. The decoding starts with another fully connected layer, followed by a transposed convolutional layer.

Improved localization network. We observe that the capacity of the localization network needs to be increased significantly to be able to produce usable region estimates in complex scenes. The architecture of the improved localization is presented in Table 3. As it can be seen from the table, the network mainly consists of a series of convolution, batch normalization and max pooling triplets. All activations in the network use Leaky ReLU activations. The resulting embeddings are then converted to 5 read/write parameters using a final fully connected layer.

Progressive training. Finally, we observe that setting the number of read/write iterations is more problematic in the case of real-world images with complex backgrounds, even with the MSEOT loss. In our preliminary experiments, we have observed that when the model size is kept fixed, the model tends to struggle in handling the complexity of the domain due to insufficient complexity, or quickly overfits to a degenerate autoencoder that does write operations poorly aligned with the scene structure. As a partial solution, we observe that starting with fewer read/write iterations and increasing it at later iterations yields a more stable training process.

Table 2. Architecture of the background network.

| Background Network | |
|--------------------|-------------|
| Layer | Output Size |
| Convolution 1 | 4 x 32 x 32 |
| Fully Connected | 16 |
| Fully Connected | 4096 |
| Transpose Conv. 1 | 1 x 64 x 64 |

Table 3. Architecture of the localization network used in MS-COCO experiments.

| Autoencoder Network | |
|----------------------------|--------------------|
| Layer | Output Size |
| Convolution 1_1 | 32 x 64 x 64 |
| BatchNorm 1_1 | 32 x 64 x 64 |
| MaxPool | 32 x 32 x 32 |
| Convolution 1_2 | 32 x 64 x 64 |
| BatchNorm 1_2 | 32 x 64 x 64 |
| Convolution 2_1 | 64 x 32 x 32 |
| BatchNorm 2_1 | 64 x 32 x 32 |
| MaxPool | 64 x 16 x 16 |
| Convolution 2_2 | 64 x 32 x 32 |
| BatchNorm 2_2 | 64 x 32 x 32 |
| MaxPool | 64 x 16 x 16 |
| Convolution 3_1 | 128 x 16 x 16 |
| BatchNorm 3_1 | 128 x 16 x 16 |
| MaxPool | 128 x 8 x 8 |
| Convolution 3_2 | 128 x 8 x 8 |
| BatchNorm 3_2 | 128 x 8 x 8 |
| MaxPool | 128 x 4 x 4 |
| Fully Connected | 256 |

3. RESULTS AND DISCUSSION

This section first explains the two datasets that we use to empirically observe the potential of the presented model. We then present our main experimental results on the MNIST-Scenes dataset, and the exploratory results on the MS-COCO dataset.

3.1. Datasets

For our main experiments to empirically observe the potential of the proposed model, we generate a new MNIST-based dataset, which we call the *MNIST Scenes* dataset. This dataset consists of scenes with multiple MNIST digits, therefore, it provides an experimental setup with simple shapes where the autoencoder can be trained in a reasonable amount of time. The dataset contains 10000 and 2000 randomly generated images for training and testing, respectively. The dataset is artificially generated using a Python script.

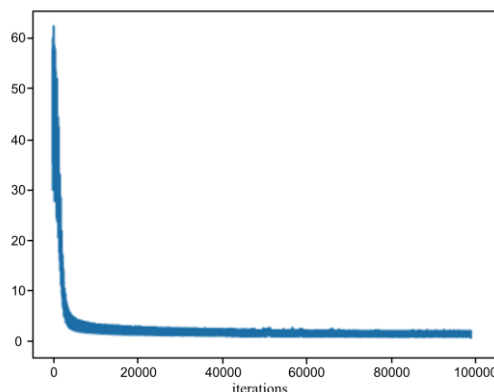


Figure 5. Test reconstruction loss over training iterations on MNIST-Scenes.

The second dataset that we use is the MS-COCO dataset [22], which contains greatly complex scenes that are typically composed of a large number of small and large objects, only some of which are annotated in the data set. To avoid computational difficulties, we resize the images to 64x64. In this resize operation, to preserve the aspect ratio of the objects, we first crop the largest possible square in each image and then, resize it to 64x64. We use 40000 training images and 4000 test images.

3.2. MNIST-Scenes Experiments

In the MNIST-Scenes experiments, our main goal is to explore the potential of the network to learn a part/object based scene model. The network is trained for 250 Epochs with a batch size of 25. The Gaussian kernel size selected for experiments is 25×25 , roughly one Gaussian per pixel in the MNIST digits. While we find that the selection of Gaussian kernel size is not a critical choice, selecting too small values tends to cause learning of very small image fragments, as opposed to parts or objects. Similarly, selecting too high values tends to cause reading and writing regions that cover multiple objects, instead of individual ones.

Figure 5 shows the reconstruction loss measured on the test set, over the training iterations. As the loss is measured on images unused for model fitting, the decrease in the loss over time quantitatively shows the progress made by the model in terms of sequential autoencoding of novel scenes.

The experiments show high segmentation performance with objects with no textured background. However, when textured background is present, the network fails to localize correctly without using higher code sizes. This in turn creates overfitting with many object patches and breaks the object-by-object reconstruction behavior.

In Figure 6, a qualitative result is presented on a scene containing seven different digits. The first image on top-left shows the original image. The following ones, listed in row-major order, visualize the canvas after each write operation. The result shows that the model is able to locate and write individual objects, achieving the desired behavior.



Figure 6. An example MNIST reconstruction result. The top-left image is the original image. The following ones show the canvas after each read/write iteration.

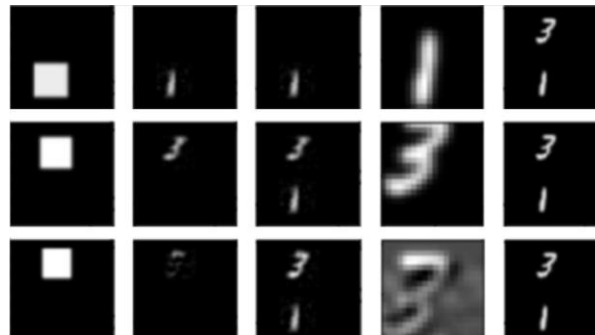


Figure 7. An image reconstruction example on MNIST-Scenes. Time points to down. The leftmost part shows the filter weights on canvas. The second column shows the image patches written at that time step. The third row shows the cumulative state of the canvas. The fourth column shows the patches read by the filter. The last column shows the original image.

To further illustrate the inner workings of the trained model, we illustrate the details of the attentive read and write operations in Figure 7. In the figure, each row shows a time step, starting from the initial one. The first column shows the attended regions, denoted by the filter weights. The second and third columns show the region to be written onto the canvas and the updated canvas status, respectively. The fourth column shows the patch that is read as the source of these write operations. Finally, the last column shows the original image. From the steps, it can be observed that the model first reads and reconstructs the digit "1" alone, and then the digit "3". The following iteration acts mainly as an improvement step that adds details for the digit "3" onto the canvas.

An interesting question is whether the network is able to implicitly localize the objects. While the network lacks an explicit encoding of object locations due to the infinite-support differentiable read/write formulation, we can still look into the localization network's behavior by analyzing the embeddings provided by the localization network, which aims to define the areas of attention for the sequential reconstruction purposes. For this purpose, we generate a sequence of images where the number "36" is smoothly moved to form a lower triangle, spanning the regions close to the lower border, the right border and the diagonal areas. We coarsely categorize these images in terms of the location of the number: on the diagonal (*diag*), on the right (*right*) and in the down parts of the image (*lower*). Finally, we calculate the position encodings given by the localization network and compute their 2-dimensional t-SNE [23] embeddings.

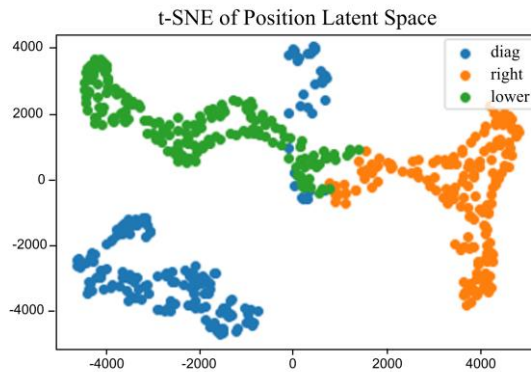


Figure 8. Analysis of the latent space generated by the localization network. The t-SNE embeddings are grouped into colors based on the location of the digit in the provided input image. All embeddings are obtained based on the same image model.



Figure 9. The reconstruction error on the MS-COCO train set over the training iterations.

The tSNE embeddings are presented in Figure 8. From the results, we observe that similarly located objects tend to yield similar tSNE embeddings, which suggests that the localization network is able to learn localizations of objects, at least to some degree. We also observe that diagonal positions have a more spreaded tSNE distribution, which is understandable as the diagonal spans a wide range of coordinates.

3.3. MS-COCO Experiments

The main goal of the MS-COCO experiments is to observe the possibility of extending the model to real-world scenes with complex backgrounds, and observe the difficulties therein. For this purpose, we monitor the ability of the model to *fit* to the train data, which is a difficulty on its own. For this purpose, we monitor the reconstruction loss over the training iterations. As it can be seen in Figure 9, the model converges slowly towards lower errors. We also observe the major error drops around iterations 5000 and 9000, following the additions of extra iterations. This observation suggests that the progressive training of the model helps the convergence.

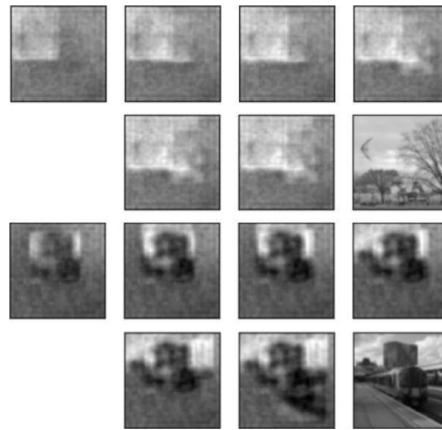


Figure 10. Qualitative reconstruction results on MS-COCO.

Two example qualitative results are given in Figure 10. In each example, we observe the change of the canvas starting from the one generated by the background model, over the read/write iterations. The very last image in each series shows the original one. In both cases, we observe that the model sequentially adds details to the scene. However, the clearly major difference between the final canvas states and the original images point out the difficulty of the task.

5. CONCLUSION

In this work, we have presented a fully-differentiable, end-to-end trained sequential autoencoding model for multi-object scenes. The model is trained in an unsupervised manner, including its localization network, as well as the read & write heads, purely driven by reconstruction quality based losses. At each iteration, the model soft-attends to a region in the image area, and updates a canvas based on its regional auto-encoding output. To enforce learning to reconstruct over major parts and objects, instead of a series of small patches, enforce the model to reconstruct the scene within a few steps via the Mean Squared Error Over Time loss. Similarly, to avoid attention onto too large or complex regions, we use a bottleneck auto-encoder at each attended region.

The experiments show that, in simple scenes, the model yields positive results with a tendency to reconstruct scenes to a large degree in an object-driven manner. While the real-world MS-COCO experiments, with the background model, also shows promising results, there is a large gap between the reconstructions and the actual scenes.

As a future work, the progress towards learning object-centric scene models can also naturally yield novel approaches to the *unsupervised image segmentation* problem, where the goal is to group pixels into semantically coherent clusters. As shown in our experimental results, the sequential generative scene model can discover objects as writing blocks. This information, therefore, has the potential of providing valuable image segmentation information, in a way fundamentally differs from the traditional techniques such as pixel-to-pixel similarity-driven graph cuts [24-25], mean-shift clustering [26], boundary-detection [27], bottom-up multi-scale hierarchical image segmentation [28] or deep network based on similar foundations [29]. An important research direction is to replace the bottleneck auto-encoder with the recent variants of deep generative models, such as GANs [1,30], VAEs [4-5,31] or the Diffusion Models [12-13].

REFERENCES

- [1] Goodfellow I. J., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., & Bengio Y. (2014). Generative Adversarial Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- [2] Arjovsky M., Chintala S., & Bottou L. (2017). Wasserstein GAN. *ArXiv:1701.07875 [Cs, Stat]*.
- [3] Karras T., Laine S., & Aila T. (2019). A Style-Based Generator Architecture for Generative Adversarial Networks. *Proc. CVPR*.

- [4] Kingma Diederik P., & Welling, M. (2014). Auto-Encoding Variational Bayes. International Conference on Learning Representations.
- [5] Rezende D. J., Mohamed S., & Wierstra D. (2014). Stochastic Backpropagation and Approximate Inference in Deep Generative Models. ArXiv:1401.4082.
- [6] Li Y., Swersky K., & Zemel R. (2015). Generative Moment Matching Networks. PMLR.
- [7] Dinh L., Sohl-Dickstein J., & Bengio S. (2016). Density estimation using Real NVP.
- [8] Kobyzev I., Prince S. J., & Brubaker M. A. (2020). Normalizing flows: An introduction and review of current methods. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 43(11), 3964-3979.
- [9] Kingma Durk P. & Dhariwal P. (2018). Glow: Generative Flow with Invertible 1x1 Convolutions. In Advances in Neural Information Processing Systems 31 (pp. 10215–10224).
- [10] Behrmann J., Grathwohl W., Chen R. T. Q., Duvenaud, D., & Jacobsen, J.-H. (2019). Invertible Residual Networks. ArXiv:1811.00995 [Cs, Stat].
- [11] Köhler J., Klein L. & Noé F. (2020). Equivariant Flows: exact likelihood generative learning for symmetric densities. ArXiv:2006.02425 [Physics, Stat].
- [12] San-Roman R., Nachmani E., & Wolf L. (2021). Noise estimation for generative diffusion models. ArXiv Preprint ArXiv:2104.02600.
- [13] Huang C.-W., Lim J. H., & Courville A. C. (2021). A variational perspective on diffusion-based generative models and score matching. Advances in Neural Information Processing Systems, 34.
- [14] Liu K., Tang W., Zhou F., & Qiu G. (2019, October). Spectral Regularization for Combating Mode Collapse in GANs. ICCV.
- [15] Brock A., Donahue J., & Simonyan K. (2018). Large Scale GAN Training for High Fidelity Natural Image Synthesis. ArXiv:1809.11096 [Cs, Stat].
- [16] Karras T., Laine S., Aittala M., Hellsten J., Lehtinen J., & Aila T. (2020). Analyzing and Improving the Image Quality of StyleGAN. Proc. CVPR.
- [17] Karnewar A., & Wang O. (2020). MSG-GAN: Multi-Scale Gradients for Generative Adversarial Networks. CVPR.
- [18] Karras T., Aittala M., Laine S., Härkönen E., Hellsten J., Lehtinen J., & Aila T. (2021). Alias-free generative adversarial networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 34.
- [19] Casanova A., Careil M., Verbeek J., Drozdal M., & Romero-Soriano, A. (2021, November). Instance-Conditioned GAN. NeurIPS.
- [20] Zhang Y., Ling H., Gao J., Yin K., Lafleche J.-F., Barriuso A., Torralba A., & Fidler S. (2021). DatasetGAN: Efficient Labeled Data Factory with Minimal Human Effort. ArXiv:2104.06490 [Cs].
- [21] Gregor K., Danihelka I., Graves A., Rezende D. J., & Wierstra D. (2015). DRAW: A Recurrent Neural Network For Image Generation. ArXiv:1502.04623 [Cs].
- [22] Lin T.-Y., Maire M., Belongie S., Hays J., Perona P., Ramanan D., Dollár P., & Zitnick C. L. (2014). Microsoft COCO: Common Objects in Context. 740–755.
- [23] van der Maaten L., & Hinton G. (2008). Visualizing Data using t-SNE . Journal of Machine Learning Research, 9, 2579–2605.

- [24] Felzenszwalb P. F., & Huttenlocher D. P. (2004). Efficient graph-based image segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 59(2), 167–181.
- [25] Cour T., Benezit F., & Shi J. (2005). Spectral segmentation with multiscale graph decomposition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2, 1124–1131.
- [26] Comaniciu D., & Meer P. (2002). Mean shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5), 603–619.
- [27] Arbelaez P., Maire M., Fowlkes C., & Malik J. (2009). From contours to regions: An empirical evaluation. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2294–2301.
- [28] Pont-Tuset J., Arbelaez P., Barron J. T., Marques F., & Malik J. (2016). Multiscale combinatorial grouping for image segmentation and object proposal generation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(1), 128–140.
- [29] Xia, X. & Kulis B. (2017). W-net: A deep model for fully unsupervised image segmentation. *ArXiv Preprint ArXiv:1711.08506*.
- [30] Karras T., Aila T., Laine S., & Lehtinen J. (2017). Progressive growing of GANs for improved quality, stability, and variation. *Proc. Int. Conf. Learn. Represent.*
- [31] Gu, S., Chen, D., Bao, J., Wen, F., Zhang, B., Chen, D., ... & Guo, B. (2022). Vector quantized diffusion model for text-to-image synthesis. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 10696-10706).
- [32] Rombach, R., Blattmann, A., Lorenz, D., Esser, P., & Ommer, B. (2022). High-resolution image synthesis with latent diffusion models. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 10684-10695).
- [33] Zhang, B., Gu, S., Zhang, B., Bao, J., Chen, D., Wen, F., ... & Guo, B. (2022). Styleswin: Transformer-based gan for high-resolution image generation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 11304-11314).
- [34] Preechakul, K., Chatthee, N., Widadwongsa, S., & Suwajanakorn, S. (2022). Diffusion autoencoders: Toward a meaningful and decodable representation. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 10619-10629).
- [35] Ruiz, N., Li, Y., Jampani, V., Pritch, Y., Rubinstein, M., & Aberman, K. (2022). Dreambooth: Fine tuning text-to-image diffusion models for subject-driven generation. *arXiv preprint arXiv:2208.12242*.
- [36] Lee, D., Kim, C., Kim, S., Cho, M., & Han, W. S. (2022). Autoregressive Image Generation using Residual Quantization. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 11523-11532).
- [37] Kammoun, Amina, Rim Slama, Hedi Tabia, Tarek Ouni, and Mohmed Abid. "Generative Adversarial Networks for face generation: A survey." *ACM Computing Surveys (CSUR)* (2022).