



KAHRAMAMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2023

SAYI / NUMBER : 4

CILT / VOLUME : 26



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

<http://jes.ksu.edu.tr/>

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.

This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Nutrition Design Modeling Method Development For Structural And Elemental Analysis Of Bertiz Grape Pekmez Using Field Emission Gun – Scanning**
Bertiz Üzüm Pekmezinin Alan Emisyon Tabancalı–Taramalı Elektron Mikroskobu (Aet-Tem) İle Yapısal İncelemesi Ve Bileşen Modellemesi İçin Bir Besin Tasarım Yöntemi Geliştirilmesi 796-800
Yakup ERMURAT
- Influences Of Alkali Pretreatment On Lyocell Woven Fabric Properties After Abrasion**
Alkali Ön İşlemin Aşınma Sonrası Lyocell Dokuma Kumaş Özelliklerine Etkisi 801-811
Arzu ATICI, Gaye KAYA
- Al İçerğinin (Cocrfe)₆₀Al_xNi_(40-x) Yüksek Entropili Alaşımının Yapısal Ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi**
Influence Of AL Content On Structural And Mechanical Properties Of (Cocrfe)₆₀Al_xNi_(40-x) High Entropy Alloy 812-822
Gökhan POLAT, Tuğba Selcen ATALAY KALSEN
- Fabrication Of Copper Oxide Nanoparticles Doped PCL/PVP Nanofibrous Mats By Electrospinning And Evaluation Of Their Antibacterial Activities**
Bakır Oksit Nanopartikül Katkılı PCL/PVP Nanolifli Matların Elektroçekim İle Üretimi Ve Antibakteriyel Aktivitelerinin Değerlendirilmesi 823-833
Fatih ERCİ, Fatma BAYRAM SARIİPEK
- Fay Hattı Üzerinde Doğrudan Gama Doz Hızı Ölçümü, Yıllık Efektif Doz Eşdeğeri Ve Yaşam Boyu Kanser Riskinin Hesaplanması**
Direct Measurement Of Gamma Dose Rate On The Fault Line, Calculation Of Annual Effective Dose Equivalent, And Excessive Lifetime Cancer Risk 834-842
Serdar GÜMBÜR, Erdal KÜÇÜKÖNDER
- İpliği Boyalı Pamuklu Kumaşlarda Ağartma İşleminin Mukavemete Ve Renk Farkına Etkisinin İncelenmesi**
Investigation Of The Effect Of Bleaching Process On Strengt And Color Difference In Yarn Dyed Cotton Fabrics 843-852
Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ, Feyza AKARSLAN KODALOĞLU
- Katı Yağlayıcı Olarak Grafit Katkılı Naylon 6 Kompozitlerin Mekanik Ve Tribolojik Performansları**
Mechanical And Tribological Performance Of Graphite Filled Nylon-6 Composites As Solid Lubricant 853-865
Hüseyin ÜNAL, Salih Hakan YETGİN, Veysel Furkan ÜNAL

- Sentinel-2 MSI Ve Landsat-9 OLI Uydu Görüntüleriyle Yanmış Alanların Tespiti: 2022 Muğla/Marmaris Orman Yangını**
Detection Of Burned Areas With Sentinel-2 MSI And Landsat-9 OLI Satellite Images: 2022 Muğla/Marmaris Forest Fire 866-880
Emre YÜCER
- Değer Akış Haritalama Yöntemi Ve Bir İmalat İşletmesinde Uygulanması**
Value Stream Mapping Method And Application In A Manufacturing Company 881-894
Eda COŞKUN, Selçuk ÖZCAN
- Parçalı Gölgeleme Durumunda Yapay Sinir Ağları Ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Bir Maksimum Güç Noktası Takibi Algoritması**
A Maximum Power Point Tracking Algorithm Based On Artificial Neural Network And Particle Swarm Optimization In Partial Shading 895-908
Elif BALDAN, Hüseyin ERİŞTİ
- Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Zorlanmış Titreşim Analizi**
Forced Vibration Analysis Of Functionally Graded Porous Sandwich Beams 909-921
Ajmal CHOPAN, Ahmad Reshad NOORI
- Hijyenik Pedlerin Cilt Tabakasına Uygun Dokusuz Yüzeylerin Konfor Bileşenlerinin İncelenmesi**
Investigating Comfort Components Of Non-Woven Surfaces Suitable For The Skin Layer Of Sanitary Pads 922-931
Gizem Ceylan TÜRKOĞLU, Nazlı ÜREN
- Quantum Key Distribution In Smart Home Systems**
Akıllı Ev Sistemlerinde Kuantum Anahtar Dağıtımı 932-942
Nurcihan DERE, Eyüp Emre ÜLKÜ
- Pamuk Ve Viskon Lifleri Kullanarak Tek Boya Banyosunda Degrade Etketli Örme Kumaş Geliştirilmesi**
Development Of Graded-Effect Knitted Fabric In A Single Dye Bath Using Cotton And Viscose Fibers 943-950
Fatma DEMİRCİ, Selver Zilan ERÇOŞMAN
- Kilin Mukavemeti Ve Donma-Çözülme Sonrası Mukavemeti Üzerinde Biyopolimer Ve Lif Katkısının Ortak Etkisinin Araştırılması**
Investigation The Combined Effect Of Biopolymer And Fiber Additives On Strength And Post Freezing-Thawing Strength Of Clay 951-961
Büşra GÜVEN, Şifa GÜNEK, Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
- Yüksek Çözünürlüklü Spektrogram Görüntülerinden Akaze Yöntemi İle Ses Sahteciliği Tespiti**
Audio Forgery Detection From High-Resolution Spectrogram With Akaze Method 962-971
Beste ÜSTÜBİOĞLU, Gül TAHAOGLU
- Investigating Cutting Force And Cutting Power When Turning AA6082-T4 Alloy At Cutting Depths Smaller Than Tool Nose Radius**
AA6082-T4 Alaşımının Takım Burun Yarıçapından Daha Küçük Kesme Derinliklerinde Tornalanmasında Kesme Kuvveti Ve Kesme Gücünün Araştırılması 972-982
Kutay AYDIN
- Kapasiteli Tek Atamalı Yeşil Anadağıtım Üssü Kapsama Akış Problemi**
Capacitated Single Allocation Green Hub Covering Flow Problem 983-996
Nazmi ŞENER

Image Fusion And Deep Learning Based Ear Recognition Using Thermal And Visible Images Termal Ve Görünür Görüntüler Kullanılarak Görüntü Birleştirme Ve Derin Öğrenme Tabanlı Kulak Tanıma	997-1009
Mücahit CİHAN, Murat CEYLAN	
Collocation Method Applied To Numerical Solution Of Integro-Differential Equations Integro-Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümüne Uygulanan Kollokasyon Yöntemi	1010-1020
Birkan DURAK, Aziz SEZGİN, Hasan Ömür ÖZER, Lütfi Emir SAKMAN, Şule KAPKIN	
An Experimental Investigation Of The Speed Losses In Poly-V Belt Systems On Household Dryers Ev Tipi Kurutucularda Bulunan Poly-V Bant Sistemlerindeki Hız Kayıplarının Deneysel Olarak İncelenmesi	1021-1029
Mehmet MUTLUDOGAN, Berna BOLAT, Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ	
STM32f407 Ve Nodemcu ESP8266 Kartları Kullanarak Kablosuz Çok Yönlü Kontrollü Robotik Araç Sisteminin Geliştirilmesi Development Of A Wireless Multi Way Controlled Robotic Vehicle System Using STM32f407 And Nodemcu ESP8266 Boards	1030-1049
Muhammet Fatih ACUN, Metehan DALDAL, Kemal AVCI	
Blood Pressure And Heart Rate Estimation Via TQWT Based Decomposition Of PPG Signals PPG Sinyallerinin TQWT Tabanlı Ayrıştırılması Yoluyla Kan Basıncı Ve Kalp Atış Hızı Tahmini	1050-1060
Fatma Sevde KÖKLÜKAYA, Mahmut ÖZTÜRK	

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin Geliştirilen Taşınabilir Elektroçirme Cihazları Portable Electrospinning Devices Developed For Tissue Engineering Applications	1061-1077
Merve YILMAZ, Nazmi EKREN	
Eklemeli İmalat Teknolojisinin Demiryolu Endüstrisinde Kullanımı Üzerine Bir Derleme A Review On The Use Of Additive Manufacturing Technology In The Railway Industry	1078-1096
İbrahim ASLAN, Ahmet CAN	



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 26 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Eda GÖZ | Gediz UĞUR |
| Erdal KARADURMUŞ | Görkem GEDİK |
| Gülhan GÜLER | Mustafa Güven GÖK |
| Canan AKSU CANBAY | Habib AKYAZI |
| Muhammet KARATAŞLI | Ömer SÖĞÜT |
| Ayşegül KÖRLÜ | Gülbin FİDAN |
| Sabih OVALI | Fuat KARA |
| Onur ÖZBEK | Muhterem KÜÇÜKÖNDER |
| Emel ZERAY ÖZTÜRK | Nalan Gülten AKIN |
| İrem DÜZDAR | Mehmet İsmail GÜRSOY |
| Alper KEREM | Pınar Aydan DEMİRHAN |
| Muhittin TURAN | Serdar ÇARBAŞ |
| Ayşe Ebru TAYYAR | Suat ÇETİNER |
| Ömür ŞAHİN | Gözde KARATAŞ BAYDOĞMUŞ |
| Seval UYANIK | Sabiha Sezgin BOZOK |
| Ahmet Şahin ZAIMOĞLU | Mesut GÖR |
| Arda Burak EKMEK | Bilgehan GÜRÜNLÜ |
| Erkan BURUCU | Oğuz TUNÇEL |
| Cihat ENSARIOĞLU | Sezgin ESER |
| Sezin GÜLERYÜZ ERGÜL | İlayda ÜLKÜ |
| Beste DESTECİOĞLU TAŞDEMİR | Kubilay Muhammet SÜNNETÇİ |
| Turab SELÇUK | Fatma ÖZCAN |
| Şahsene ALTINKAYA | Çağlar KAHYA |
| Halil ÇETİN | Hüseyin İMREK |
| Haithem ALJAWAD | Mustafa GÖKSU |
| Faruk Enes OĞUZ | Eray SAKARYA |
| Yunus Ziya ARSLAN | Hasan DEMİR |
| Songül ULAĞ | Süreyya KOCABEY |

Ercan AYKUT
Muhammet İbrahim AŞCI

Faruk MERT



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Nutrition Design Modeling Method Development For Structural And Elemental Analysis Of Bertiz Grape Pekmez Using Field Emission Gun – Scanning**
Bertiz Üzüm Pekmezinin Alan Emisyon Tabancalı–Taramalı Elektron Mikroskobu (Aet-Tem) İle Yapısal İncelemesi Ve Bileşen Modellemesi İçin Bir Besin Tasarım Yöntemi Geliştirilmesi 796-800
Yakup ERMURAT
- Influences Of Alkali Pretreatment On Lyocell Woven Fabric Properties After Abrasion**
Alkali Ön İşlemin Aşınma Sonrası Lyocell Dokuma Kumaş Özelliklerine Etkisi 801-811
Arzu ATICI, Gaye KAYA
- Al İçerğinin (Cocrfe)₆₀Al_xNi_(40-x) Yüksek Entropili Alaşımının Yapısal Ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi**
Influence Of AL Content On Structural And Mechanical Properties Of (Cocrfe)₆₀Al_xNi_(40-x) High Entropy Alloy 812-822
Gökhan POLAT, Tuğba Selcen ATALAY KALSEN
- Fabrication Of Copper Oxide Nanoparticles Doped PCL/PVP Nanofibrous Mats By Electrospinning And Evaluation Of Their Antibacterial Activities**
Bakır Oksit Nanopartikül Katkılı PCL/PVP Nanolifli Matların Elektroçekim İle Üretimi Ve Antibakteriyel Aktivitelerinin Değerlendirilmesi 823-833
Fatih ERCİ, Fatma BAYRAM SARIİPEK
- Fay Hattı Üzerinde Doğrudan Gama Doz Hızı Ölçümü, Yıllık Efektif Doz Eşdeğeri Ve Yaşam Boyu Kanser Riskinin Hesaplanması**
Direct Measurement Of Gamma Dose Rate On The Fault Line, Calculation Of Annual Effective Dose Equivalent, And Excessive Lifetime Cancer Risk 834-842
Serdar GÜMBÜR, Erdal KÜÇÜKÖNDER
- İpliği Boyalı Pamuklu Kumaşlarda Ağartma İşleminin Mukavemete Ve Renk Farkına Etkisinin İncelenmesi**
Investigation Of The Effect Of Bleaching Process On Strengt And Color Difference In Yarn Dyed Cotton Fabrics 843-852
Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ, Feyza AKARSLAN KODALOĞLU
- Katı Yağlayıcı Olarak Grafit Katkılı Naylon 6 Kompozitlerin Mekanik Ve Tribolojik Performansları**
Mechanical And Tribological Performance Of Graphite Filled Nylon-6 Composites As Solid Lubricant 853-865
Hüseyin ÜNAL, Salih Hakan YETGİN, Veysel Furkan ÜNAL

- Sentinel-2 MSI Ve Landsat-9 OLI Uydu Görüntüleriyle Yanmış Alanların Tespiti: 2022 Muğla/Marmaris Orman Yangını**
Detection Of Burned Areas With Sentinel-2 MSI And Landsat-9 OLI Satellite Images: 2022 Muğla/Marmaris Forest Fire 866-880
Emre YÜCER
- Değer Akış Haritalama Yöntemi Ve Bir İmalat İşletmesinde Uygulanması**
Value Stream Mapping Method And Application In A Manufacturing Company 881-894
Eda COŞKUN, Selçuk ÖZCAN
- Parçalı Gölgeleme Durumunda Yapay Sinir Ağları Ve Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Bir Maksimum Güç Noktası Takibi Algoritması**
A Maximum Power Point Tracking Algorithm Based On Artificial Neural Network And Particle Swarm Optimization In Partial Shading 895-908
Elif BALDAN, Hüseyin ERİŞTİ
- Fonksiyonel Derecelendirilmiş Gözenekli Sandviç Kirişlerin Zorlanmış Titreşim Analizi**
Forced Vibration Analysis Of Functionally Graded Porous Sandwich Beams 909-921
Ajmal CHOPAN, Ahmad Reshad NOORI
- Hijyenik Pedlerin Cilt Tabakasına Uygun Dokusuz Yüzeylerin Konfor Bileşenlerinin İncelenmesi**
Investigating Comfort Components Of Non-Woven Surfaces Suitable For The Skin Layer Of Sanitary Pads 922-931
Gizem Ceylan TÜRKOĞLU, Nazlı ÜREN
- Quantum Key Distribution In Smart Home Systems**
Akıllı Ev Sistemlerinde Kuantum Anahtar Dağıtımı 932-942
Nurcihan DERE, Eyüp Emre ÜLKÜ
- Pamuk Ve Viskon Lifleri Kullanarak Tek Boya Banyosunda Degrade Etketli Örme Kumaş Geliştirilmesi**
Development Of Graded-Effect Knitted Fabric In A Single Dye Bath Using Cotton And Viscose Fibers 943-950
Fatma DEMİRCİ, Selver Zilan ERCOŞMAN
- Kilin Mukavemeti Ve Donma-Çözülme Sonrası Mukavemeti Üzerinde Biyopolimer Ve Lif Katkısının Ortak Etkisinin Araştırılması**
Investigation The Combined Effect Of Biopolymer And Fiber Additives On Strength And Post Freezing-Thawing Strength Of Clay 951-961
Büşra GÜVEN, Şifa GÜNEK, Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
- Yüksek Çözünürlüklü Spektrogram Görüntülerinden Akaze Yöntemi İle Ses Sahteciliği Tespiti**
Audio Forgery Detection From High-Resolution Spectrogram With Akaze Method 962-971
Beste ÜSTÜBİOĞLU, Gül TAHAOGLU
- Investigating Cutting Force And Cutting Power When Turning AA6082-T4 Alloy At Cutting Depths Smaller Than Tool Nose Radius**
AA6082-T4 Alaşımının Takım Burun Yarıçapından Daha Küçük Kesme Derinliklerinde Tornalanmasında Kesme Kuvveti Ve Kesme Gücünün Araştırılması 972-982
Kutay AYDIN
- Kapasiteli Tek Atamalı Yeşil Anadağıtım Üssü Kapsama Akış Problemi**
Capacitated Single Allocation Green Hub Covering Flow Problem 983-996
Nazmi ŞENER

Image Fusion And Deep Learning Based Ear Recognition Using Thermal And Visible Images Termal Ve Görünür Görüntüler Kullanılarak Görüntü Birleştirme Ve Derin Öğrenme Tabanlı Kulak Tanıma	997-1009
Mücahit CİHAN, Murat CEYLAN	
Collocation Method Applied To Numerical Solution Of Integro-Differential Equations Integro-Diferansiyel Denklemlerin Sayısal Çözümüne Uygulanan Kollokasyon Yöntemi	1010-1020
Birkan DURAK, Aziz SEZGİN, Hasan Ömür ÖZER, Lütfi Emir SAKMAN, Şule KAPKIN	
An Experimental Investigation Of The Speed Losses In Poly-V Belt Systems On Household Dryers Ev Tipi Kurutucularda Bulunan Poly-V Bant Sistemlerindeki Hız Kayıplarının Deneysel Olarak İncelenmesi	1021-1029
Mehmet MUTLUDOGAN, Berna BOLAT, Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ	
STM32f407 Ve Nodemcu ESP8266 Kartları Kullanarak Kablosuz Çok Yönlü Kontrollü Robotik Araç Sisteminin Geliştirilmesi Development Of A Wireless Multi Way Controlled Robotic Vehicle System Using STM32f407 And Nodemcu ESP8266 Boards	1030-1049
Muhammet Fatih ACUN, Metehan DALDAL, Kemal AVCI	
Blood Pressure And Heart Rate Estimation Via TQWT Based Decomposition Of PPG Signals PPG Sinyallerinin TQWT Tabanlı Ayrıştırılması Yoluyla Kan Basıncı Ve Kalp Atış Hızı Tahmini	1050-1060
Fatma Sevde KÖKLÜKAYA, Mahmut ÖZTÜRK	

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

Doku Mühendisliği Uygulamaları İçin Geliştirilen Taşınabilir Elektroçirme Cihazları Portable Electrospinning Devices Developed For Tissue Engineering Applications	1061-1077
Merve YILMAZ, Nazmi EKREN	
Ekllemeli İmalat Teknolojisinin Demiryolu Endüstrisinde Kullanımı Üzerine Bir Derleme A Review On The Use Of Additive Manufacturing Technology In The Railway Industry	1078-1096
İbrahim ASLAN, Ahmet CAN	



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.03.2023
Kabul Tarihi : 21.07.2023

Received Date : 17.03.2023
Accepted Date : 21.07.2023

NUTRITION DESIGN MODELING METHOD DEVELOPMENT FOR STRUCTURAL AND ELEMENTAL ANALYSIS OF BERTİZ GRAPE PEKMEZ USING FIELD EMISSION GUN – SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (FEG-SEM)

BERTİZ ÜZÜM PEKMEZİNİN ALAN EMİSYON TABANCALI-TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (AET-TEM) İLE YAPISAL İNCELEMESİ VE BİLEŞEN MODELLEMESİ İÇİN BİR BESİN TASARIM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

Yakup ERMURAT^{1*} (ORCID: 0000-0002-0159-5283)

¹Bolu Abant İzzet Baysal University, Department of Chemical Engineering, Engineering Faculty, Bolu, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yakup ERMURAT, yakupermurat@ibu.edu.tr

ABSTRACT

Bertiz kabarcık (buble) grape pekmez nutrition design modeling method development was studied by structure analysis and composition modeling using the Field Emission Gun – Scanning Electron Microscope (FEG-SEM). A uniform static, soil-mineral like and non-crystal solid surface was detected in pekmez sample structural images. The high value of carbon (69.89%), oxygen (28.14%), phosphorus (0.69%) and potassium (1.28%) peak patterns indicated that the pekmez is a sugar and mineral composition model. Deficiency of purification and clarification were presented in the pekmez samples produced by traditional way, and less pure and clear pekmez product was detected in the structural images. However, the liquid concentrated form of these grape samples completely dissolved at room temperature. Pekmez soft drinks; Pekmez Cola including caffeine, Pekmez Gazoz with no additives and Pekmez Limon comprising lemon flavor were prepared using the carbonated pekmez solutions without any sugar additives.

Keywords: Nutrition design method modeling development, structure analysis, composition modeling, Bertiz grape pekmez, Pekmez Cola, Pekmez Gazoz, Pekmez Limon, Field Emission Gun – Scanning Electron Microscope (FEG-SEM)

ÖZET

Bertiz kabarcıklı üzüm pekmezi besin tasarımı modelleme yöntemi geliştirmek için, Alan Emisyon Tabancası – Taramalı Elektron Mikroskobu (FEG-SEM) kullanılarak yapı analizi ve kompozisyon modellemesi ile çalışılmıştır. Pekmez örneğinin yapısal görüntülerinde katı-durağan, toprak-mineral benzeri ve kristal olmayan katı yüzeyler tespit edilmiştir. Karbon (%69.89), oksijen (%28.14), fosfor (%0.69) ve potasyum (%1.28) pik değerlerinin yüksek olması pekmezin şeker ve mineral bileşim modeli olduğunu göstermektedir. Geleneksel yöntemlerle üretilen pekmez örneklerinde saflaştırma ve durultma eksikliği görülmüş, yapısal görüntülemelerde ise daha az saf ve berrak pekmez ürünü tespit edilmiştir. Buna rağmen, bu üzüm pekmezinin sıvı yoğun hali oda sıcaklığında tamamen çözünmüştür. Gazlı pekmez çözeltileri kullanılarak hiçbir şeker katkısı içermeyen kafeinli Pekmez Kola, katkısız Pekmez Gazoz, ve limon aromalı Pekmez Limon meşrubatları hazırlanmıştır.

To Cite: ERMURAT, Y. (2023). NUTRITION DESIGN MODELING METHOD DEVELOPMENT FOR STRUCTURAL AND ELEMENTAL ANALYSIS OF BERTİZ GRAPE PEKMEZ USING FIELD EMISSION GUN – SCANNING ELECTRON MICROSCOPE (FEG-SEM). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 796-800.

Anahtar Kelimeler: Beslenme tasarımı modelleme yöntemi geliştirme, yapı incelemesi, bileşen modellemesi, Bertiz kabarcığı üzüm pekmezi, Pekmez Cola, Pekmez Gazoz, Pekmez Limon, Alan Emisyon Tabancalı – Taramalı Elektron Mikroskobu (AET-TEM).

INTRODUCTION

Pekmez is an evaporated sugar containing fruit syrup molasses, traditionally and industrially produced as a concentrated viscous liquid or soft solid forms, containing the basic daily nutrient needs such as carbohydrates, proteins, vitamins and minerals (Satıl & Selvi 2022). The exceptional nutrient composition of grape pekmez provides the best nutritional daily dietary supplements such as natural sugars and amino acids, essential vitamins and minerals, antioxidant agents and aroma compounds which need to be adequately formulated (Alkoshab et al., 1988; Spayd & Bagge 1996). The grape pekmez naturally comprises good source of certain specific sugars, amino acids, riboflavin (vitamin B2), phosphorus, potassium and an inimitable source of calcium (Batu 1993). Varieties of grapes (*Vitis Vinifera*) among many grown in Türkiye, Bertiz Kabarcık, Gülşehir Göğçek, Bornova Misket, Kırklareli İlkeren grapes... are commonly used for production of grape pekmez. The basic production steps of viscous liquid grape pekmez process include grape harvesting, picking, squeezing and syrup boiling and evaporation.

The squeezed grape syrup is boiled in open air pans under atmospheric pressure through the low scale fire application until thickening of the syrup to produce pekmez in most traditional applications (Riddel 1951; Batu 2005). Non-enzymatic browning reaction caramelization process is used in pekmez production by removal of water and breaking down of the sugars to get a sensational bitter flavor and brown color. The caramelization temperatures were determined approximately as 160 °C for sucrose and glucose, and 110 °C for fructose. Industrial pekmez production protocol includes low heat and low pressure vacuum pan operation techniques under controlled pekmez production process to evaporate water at low temperatures that protect the grape syrup from nutrition decomposition and further caramelization. A case study of pekmez was accomplished to optimize grape juice deacidification using mixture of adsorbents (Rezaei et al., 2020). White soil is used as adsorbent for clearing purposes in the traditional process, and calcium hydroxide is used in decantation process in industrial pekmez production. The soft-solid white and brown solid pekmez are produced using the liquid form of pekmez by addition of the solidifying and whitening agents and longtime mixing, and sold in cylindrical wooden boxes called as külek pekmez. The studies state that the liquid concentrated form of grape pekmez contains minimum of 65% total crystalline dry matter and soluble solids (45.3 to 75 °Brix), and the liquid concentrated and the solid pekmez are quickly and totally soluble even at room temperature. Pekmez samples as browned caramel like natural sweeteners have been tested to characterize sweetener features, color, and biochemical properties using standard and local pekmez samples of grape types grown in Türkiye (Alpaslan & Hayta 2002; Yoğurtçu & Kamışlı 2006; Kaya & Gunasekaran 2011).

The form of physical structure and assortment of nutritional composition of pekmez deviates depending on the grape origin and types, and traditional and industrial production process conditions (Türkben et al., 2016). All kinds of grapes and sugary fruits can be used for pekmez production; however white kabarcık (bubble) grapes which is exclusively grown in the right ecology and climate region of Bertiz of Kahramanmaraş province are the best proper type of grape for pekmez production. Bertiz kabarcık grapes are not only preferred for pekmez production, they are also favored as table grape consumption. Bertiz type pekmez alike the other pekmez types, is mostly produced through traditional way identically attributes vital nutrients, exclusive mouth feels, taste, color, odor and texture.

Processing factors and pekmez solidification and the material behavior were investigated, and increased pekmez viscosity was observed with high solid content at low temperature, and pekmez dry matter up to 75 °Brix was classified as a Newtonian product. Chemical and physical properties of various fruit pekmez samples were analyzed, and high bioavailable trace element contents of iron (Fe⁺²) and selenium were determined in grape pekmez (Aliyazıcıoğlu et al., 2009). The viscosity characteristics effect the freshness time of pekmez. The viscous pekmez stays fresh over months without microbial contamination and conserves highly nutritive value, flavors and red-brownie texture. The physical ability viscosity tests of the pekmez samples were accomplished to determine solidity specifics of dry pekmez samples and the average dissolving ability was detected by mixing the pekmez samples. The effects of storage period and conditions on chemical properties of grape pekmez produced classical and vacuum methods were investigated, and average copper, manganese, phosphorus, and sodium contents in

pekmez samples produced by the vacuum method were found higher than that of the classical method (Demirci 2006; Demirci & Kayışoğlu, 2006; Tunç et al., 2022).

Sweet food staffing are produced using pekmez, starch and walnut derivatives in different pekmez producing regions. Yoğurt and tahin mixed with pekmez mixtures are consumed at any time of the day, especially at breakfasts (Öztürk & Öner 1999). Pekmez boiling with bulgur, pumpkin and sour grape makes kırma, pumpkin and grape jams respectively. There are perfect spreading characteristics of all kinds of white or brown solid pekmez. The grape pekmez can be used as a natural sugar replacement, so trials have been made for the usage of pekmez in the production of ice cream, chocolates and choconuts. Production of the carbonated pekmez soft drinks is formulated and prepared by using various drink additives to produce Pekmez Gazoz without any additives, Pekmez Cola includes caffeine and Pekmez Limon contains lemon aroma (Ermurat 2006). No sugar addition was needed to the pekmez soft drinks due to natural and original grape sugar amount in pekmez syrups.

MATERIALS AND METHODS

Samples of kabarcık grape pekmez in concentrated liquid form produced by traditional processing method originated from Bertiz cultivar of Kahramanmaraş region were used in this research. The pekmez samples were dried away from the exposure of sun light at room temperature to get solid form without using any drying equipment. The dry pekmez samples were used for microstructural imaging and elemental analysis using the Quanta 250 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FEG-SEM) of Düzce University, and the structural imaging, elemental peak patterns graph and elemental values table of the pekmez samples were obtained. The pekmez samples were used as natural sugar replacement to produce ice cream, chocolates and choconuts. Viscous liquid form of pekmez dissolved in water and food grade carbon dioxide gas was used for carbonation of pekmez solutions in soft drink carbonator for preparation of pekmez soft drinks.

RESULTS AND DISCUSSIONS

The dry Bertiz pekmez samples were analyzed using the FEG-SEM for the determination of the pekmez physico-chemical characteristics examinations to have a pekmez nutrition design modeling method development.

Figure 1 a and b show the FEG-SEM images of dried Bertiz pekmez samples which were provided in the size of 50 µm for the structure analysis.

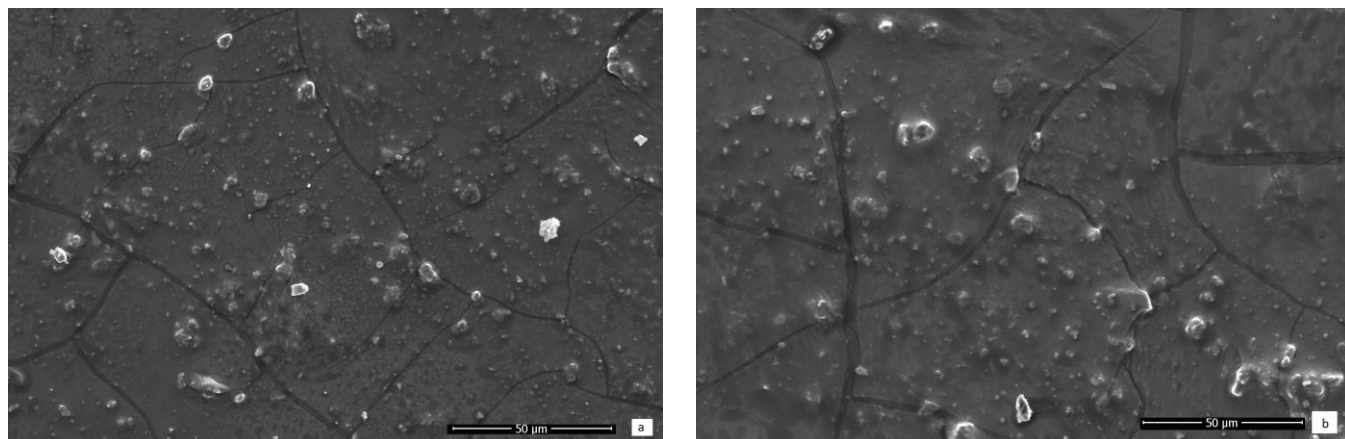


Figure 1. The FEG-SEM images of Bertiz Pekmez Samples in the size of 50 µm.

The peak patterns graph of the 'Energy Dispersive X-Ray Analysis' (EDAX) elemental constituents of the dry pekmez samples was determined using the FEG-SEM for composition modeling as given in Figure 2.

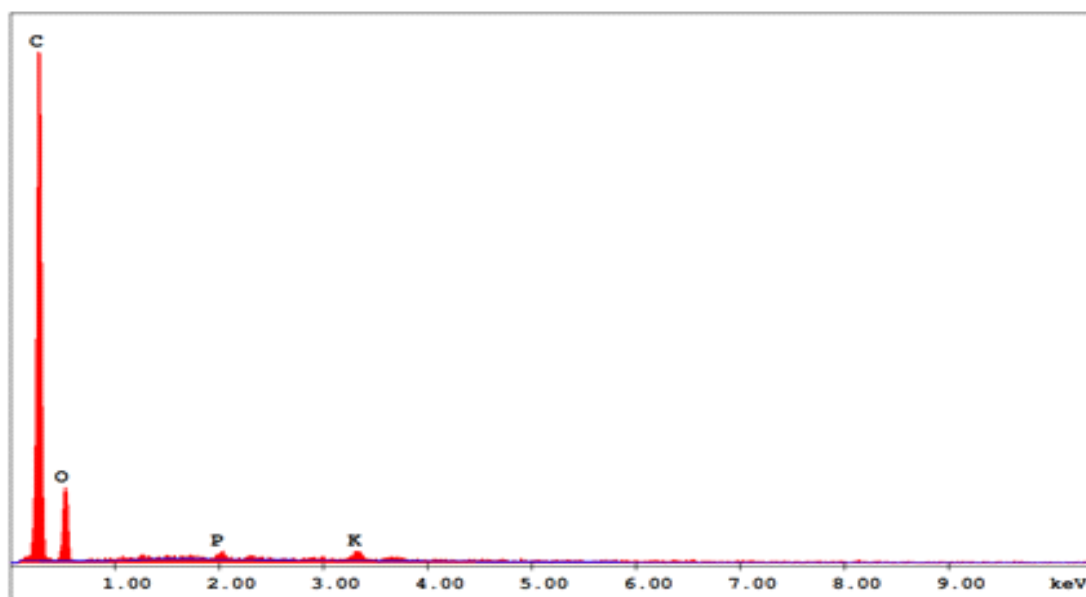


Figure 2. The FEG-SEM EDAX Elemental Peak Patterns Graph of the Dry Pekmez Sample.

The EDAX elemental constituent data of dry Bertiz pekmez samples were shown in Table 1.

Table 1. The elemental constituent data of Bertiz Pekmez Samples.

Elements	Wt%
C	69.89
O	28.14
P	0.69
K	1.28
Total	100

Establishment of significant pekmez nutrition design modeling method development is subject to physical characteristics such as hardness, viscosity, solubility and dissolving ability, and chemical characteristics such as sugar and mineral contents. Texture analysis and formulation modeling studies of the Bertiz pekmez are an effective form of nutrition design modeling method development using electron microscopy to assess improved pekmez and pekmez products production. The traditionally produced Bertiz type kabarcık grape syrup molasses which offers the basic daily nutrients such as sugar, vitamins, amino acids and minerals were used in this study to investigate the physical and chemical properties to accomplish nutrition property design modeling method development.

Pekmez models were performed relying on hardness, viscosity and dissolving ability, sugar and mineral contents in grape pekmez and products that can be accomplished using electron microscopy methods. The FEG-SEM microstructural examinations provided brownie sedimentary surface matrix structural perspective images resulting in certain significant findings in the form of Bertiz pekmez samples as seen in Figure 1. Soil-mineral like, non-crystal, uniform static, solid surface physical appearances were detected in the pekmez sample structural images. No purity and clarity was detected in the structural images of the dried pekmez samples. The elemental analysis peak patterns presented in Figure 2, and composition data shown in Table 1, altogether demonstrate high value of

carbon peaks with abundant carbon (69.89%) and oxygen (%28.14) amounts, and phosphorus (0.69%) and potassium (1.28%) elements which refer to the plentiful carbohydrate and mineral nutrition contents. Indications of high value of carbon peak patterns and observed phosphorus and potassium elements suggest that the pekmez exhibits a sugar and mineral composition model. Appearance of the bioavailable trace elements of iron, selenium, copper, manganese and sodium elements in the investigated pekmez samples were not recorded conceivably due to outstanding carbon value as all were observed in the reputable studies (Batu 1993; Aliyazıcıoğlu et al., 2009; Demirci 2006; Demirci & Kayışoğlu, 2006; Tunç et al., 2022).

The solid content of viscous liquid pekmez was measured as 64 °Brix, and remained fresh for six months storage period at room temperature without crystallization and microbial contamination, while conserving the nutritive value, sweetness, odors, flavors and brownie-like texture as stated in related literatures (Alpaslan & Hayta 2002; Yoğurtçu & Kamışlı 2006; Kaya & Gunasekaran 2011). Sensational bitter taste, flavor and caramel color, 6.7 pH and 278 mV values were recorded in the pekmez sample solutions, and weak resistance to pH changes was noted. The soft-solid white and brown solid külek pekmez, with flawless spreading capabilities was shown similar dissolving capability, aroma and taste compared to viscous liquid pekmez. Production of the several nutritious products confirms the expediency of pekmez product. Ice cream, chocolates and choco-nuts were exceptionally produced using pekmez samples as natural sugar, nutrition, taste, odor and color replacement. Potassium and phosphate contents of pekmez indicate electrolyte minerals that supply energetic enhancement in the body. Various carbonated pekmez soft beverages as Pekmez Gazoz containing any additives, Pekmez Cola including caffeine and Pekmez Limon comprising lemon aroma were prepared without any sugar additions.

CONCLUSIONS

The natural pekmez of Bertiz kabarcık (bubble) grape possesses a sedimentary surface structure and carbohydrate and mineral nutrition composition model. Refinement and purification insufficiency were determined in the pekmez samples, and no clear pekmez product was identified in the structural images. The best spreading feature was determined to be the key character of soft solid pekmez. The samples of pekmez were fully dissolved in water and carbonated pekmez soft drink beverages, Pekmez Gazoz without any additives, Pekmez Cola including caffeine and Pekmez Limon containing lemon aroma were produced with no sugar additives. The observed amount of the carbohydrate and mineral nutrition contents of pekmez can be applied to better nutrition design modeling. This developed method proposes a useful tool to differentiate structure and constituents of pekmez of various grape varieties, and the parameters of pekmez and pekmez products production can be well projected to have systematic and methodological manufacturing.

REFERENCES

- Aliyazıcıoğlu, R., Kolaylı S., Kara M., Yıldız O., Sarıkaya A.O., Cengiz S. & Er F. (2009). Determination of chemical, physical and biological characteristics of some pekmez (molasses) from Turkey. *Asian Journal of Chemistry* 21(3): 2215-2223.
- Alkoshab, O., Righetti T.L. & Dixon, A. R. (1988). Evaluation of DRIS for judging the nutritional status of pekmez. *JASHS* 113(4); 643-647.
- Alpaslan, M. & Hayta, M. (2002). Rheological and sensory properties of pekmez (grape molasses/tahin) (sesame paste blends). *Journal of Food Engineering* 54; 89-93.
- Batu, A. (1993). The importance of raisin and high concentrated fruit juice (pekmez) on human health and nutrition. *Gıda* 18 (5); 303 -307.
- Batu, A. (2005). Production of liquid and white solid pekmez in turkey. *Journal of Food Quality* 28; 417-427. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2005.00045.x>.
- Demirci, S.K.M. (2006). Effects of storage time and condition on mineral contents of grape pekmez produced by vacuum and classical methods. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi* 3(1); 1-7.
- Kaya A., Ko, S. & Gunasekaran S. (2011). Viscosity and color change during in situ solidification of grape pekmez. *Food and Bioprocess Technology* 4(2); 241-246.
- Demirci, M. & Kayışoğlu S. (2006). Effects of storage time and condition on mineral contents of grape pekmez produced by vacuum and classical methods. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi* 3(1); 1-7. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/en/pub/jotaf/issue/19058/201574>.

- Ermurat, Y., (2006). Pekmez çözeltilerinin karbonatlanması ve üzüm pekmezi alkolsüz içecekleri Pekmez Kola, Pekmez Gazoz, ve Pekmez Limon'un formülize edilmesi ve üretimi. *Standard* 45(536); 86-88.
- Öztürk, B.A. & Öner, M.D. (1999). Production and evaluation of yogurt with concentrated grape juice. *Journal of Food Engineering* 64(3); 530-532.
- Riddel, J.L. (1951). Vacuum pan operation in production of concentrated grape juice. *Am. J. Enol. Vitic.*, 2: 177
- Karababa, E. & Işıklı, N.D. (2005). Pekmez: A traditional concentrated fruit product. *Food Reviews International* 21; 357-366.
- Rezaei, M., Khaledabad, M.A., Kia, E.M. & Ghasempour, Z. (2020). Optimization of grape juice deacidification using mixture of adsorbents: A case study of pekmez. *Food Sci Nutr* 8; 2864–2874. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1586>.
- Satıl, F. & Selvi, S. (2022). Traditional molasses production from different plants in Anatolia and its ethnobotanical features . *Biological Diversity and Conservation* , 15 (1) , 62-72 . <https://doi.org/10.46309/biodicon.2022.1068816>.
- Spayd, S. & Bagge, E.J.A. (1996). Free amino acid composition of grape juice from 12 *Vitis vinifera* Cultivars in Washington. *AJEV* 47: 389 – 402.
- Tunç, M.T., Akdoğan, A., Baltacı, C., Kaya, Z. & Odabaş, H.İ. (2022). Production of grape pekmez by Ohmic heating-assisted vacuum evaporation. *Food Sci Technol Int* 28(1); 72-84. <https://doi.org/10.1177/1082013221991616>.
- Türkben, C., Suna, S., İzli, G., Uylaşer, V. & Demir, C. (2016). Physical and chemical properties of pekmez molasses produced with different grape cultivars. *Journal of Agricultural Sciences* 22; 339-348
- Yoğurtçu, H. & Kamışlı, F. (2006). Determination of rheological properties of some pekmez samples in Turkey, *Journal of Food Engineering*, 77(4); 1064-1068. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.036>.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.03.2023
Kabul Tarihi : 04.09.2023

Received Date : 31.03.2023
Accepted Date : 04.09.2023

INFLUENCES OF ALKALI PRETREATMENT ON LYOCELL WOVEN FABRIC PROPERTIES AFTER ABRASION

ALKALI ÖN İŞLEMİN AŞINMA SONRASI LYOCELL DOKUMA KUMAŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Arzu ATICI¹ (ORCID: 0000-0002-2226-8337)
Gaye KAYA^{1*} (ORCID: 0000-0003-1866-4799)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Textile Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gaye KAYA, gkaya@ksu.edu.tr

ABSTRACT

In this study, alkali pretreatment was applied to Lyocell woven fabrics at various concentrations to decrease the tendency of fiber fibrillation, and the influence of alkali pretreatment on the tensile and tearing properties of Lyocell fabrics after abrasion was investigated. Alkali pretreatment reduced fibrillation of Lyocell fibers. However, fabric shrinkage occurred because of the increased volume and damaged twisted structure of yarns due to the lateral fiber swelling. The warp/weft densities and crimp ratios increased as the alkali concentrations increased. The breaking and tearing loads of untreated Lyocell fabrics were higher than those of alkali pretreated fabrics since the strength loss caused by alkali pretreatment. The abrasive load caused fiber breakages and fiber entanglements on fabrics and decreased the both breaking and tearing loads. The weave types with long floating interlacements on the fabric surface were more severely damaged by exposing to abrasive load and resulted as higher strength reduction.

Keywords: Lyocell fabric, alkali pretreatment, weave types, tensile and tearing loads, abrasion

ÖZET

Bu çalışmada, Lyocell dokuma kumaşlara liflerin fibrilasyon eğilimini azaltmak için çeşitli konsantrasyonlarda alkali ön işlem uygulanmış ve alkali ön işlemin Lyocell kumaşların aşınma sonrası çekme ve yırtılma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Alkali ön işlem, Lyocell liflerin fibrilasyonunu azaltmıştır. Bununla birlikte, yanallı lif şişmesi nedeniyle artan hacim ve ipliklerin bükümlü yapısının zarar görmesinden dolayı kumaşta çekme meydana gelmiştir. Çözü/atık sıklıkları ve krimp oranları, alkali konsantrasyonları arttıkça artmıştır. Alkali ön işlemin neden olduğu dayanım kaybı nedeniyle, işlem görmemiş Lyocell kumaşların kopma ve yırtılma dayanımları, alkali ön işlem görmüş kumaşlara kıyasla daha yüksektir. Aşınma yükü, kumaşlarda lif kırılmalarına ve lif dolaşmalarına neden olmuş ve hem kopma hem de yırtılma dayanımlarını azaltmıştır. Kumaş yüzeyinde uzun atlamalara sahip dokuma türleri, aşınma yüküne maruz kalarak daha fazla hasar görmüş ve bu da daha fazla dayanım kaybı ile sonuçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lyocell kumaş, alkali ön-işlem, dokuma tipleri, çekme ve yırtılma yükleri, aşınma

INTRODUCTION

The demand for renewable, sustainable and environmentally friendly biopolymers in both production and end-of-life has provided some improvements in the production of regenerated cellulosic fibers (Gindl et al. 2006; Klemm et al. 2005). The non-toxic N-methylmorpholine-N-oxide monohydrate solution is used in the production of Lyocell (Tencel®) fibres that prevents excessive environmental pollution of viscose fiber production (Broadbent, 2001; Franks and Varga 1980). Lyocell fibres, which are produced according to wet drawing process, consist of a combination of elementary fibrils partially separated by thin-long voids extending parallel to the fiber axis (Ozturk et al., 2009). Separation of hydrogen bonds that form lateral bonds between fibrils causes fibrillation (Zhang, Shao, and Hu, 2006; Zhang, Okubayashi, and Bechtold, 2005). Fibrillation negatively affects the structural and visual of fibers (Umur, 2010). Alkali treatment, enzymes, reactive dyes, cross-linkers, resin-based finishing agents and metal ions are used to control the fibrillation tendency of Lyocell fibres. However, alkali treatment is used as the simplest and most effective method (Renfrew and Phillips, 2003; Nechwatal et al., 1999). Mechanical, structural and surface properties, colours and fibrillation tendencies of Lyocell fibers are changed depending on the alkali types and concentrations, material forms, process temperatures and the auxiliary chemicals used. The alkali pretreatment improved the surface properties of Lyocell fibers and the fibrillation tendency of the alkali pretreated Lyocell yarns decreased (Yolacan, 2009). The fibrillation tendency of Lyocell fibers decreased by the increase in sodium hydroxide (NaOH) concentrations. At higher NaOH concentrations, there is no tendency of fibrillation because of the lateral fiber swelling (Ozturk, Okubayashi, and Bechtold, 2006). Siroky et al. (2011) examined the staining behaviors of reactive dyes by alkali pretreated Lyocell woven fabric with NaOH solution. The highest dye intake was provided in Cellulose II fibers treated with 2.53 and 3.33 mol/dm³ NaOH solution. This concentration range increased color yield due to the increase in the pore volume accessible to the fiber. However, viscose fibers do not exhibit pore size changes on alkali treatments (Jaturapiree et al., 2011). Alkali pretreatments caused in lowered crease recovery, abrasion resistance, and tensile strength (Manian et al., 2006) while the reduction of fibrillation leads to better pilling resistance of Lyocell fabrics (Periyasamy, 2020). Manian et al. (2008) proposed a model related with changes occurred in Lyocell fiber structure depending on the alkali pretreatments that causes strength loss. There were no significant differences in crystallinity but, reduce in orientation degree among crystallites and amorphous regions can be caused strength loss. Rojo et al. (2013) reported an increase in amorphous regions of Lyocell fibers with a reduce in crystallinity. Swelling occurred in both Lyocell microfibers and fibers after alkali pretreatment.

Fibrillation of Lyocell fibers increases the abrasion tendency and abraded fabrics have more tendency to failure under tensile or tear loads. There are many studies in the literature to decrease the fibrillation of Lyocell fibers by alkali pretreatments. However, they are mainly concentrated on the effects of alkali pretreatment on Lyocell fiber properties. For adopting the exposed deformations of fabrics during using, it is necessary to investigate the effects of alkali pretreatment on Lyocell fabric properties. In the present work, alkali pretreatment in various concentrations was applied to Lyocell woven fabrics to decrease the fibrillation tendency of fibers and the influences of alkali pretreatments on tensile and tearing properties of Lyocell fabrics after abrasion were investigated. Tensile and tearing properties of untreated and alkali pretreated samples were compared before and after the abrasion test. The novelty of this study is investigating the effect of alkali pretreatment on fabric properties after abrasion cycles which were varied by considering weave types.

MATERIALS AND METHODS

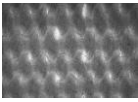
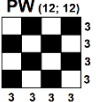
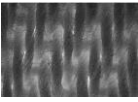
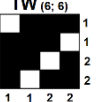
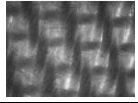
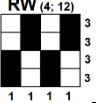
Lyocell Woven Fabrics

Lyocell woven fabrics were designed in different weave patterns as 1/1 plain (PW), 3/1 twill (TW) and 2/2 warp ribs (RW). Before alkali pretreatment, the fabric samples were washed with a non-ionic washing agent (1 g/l) at 60°C for 20 minutes at a liquor ratio of 1:100 and then rinsed and dried in the laboratory environment. Table 1 presents the specifications and microscopically views of fabrics after washing. Ne 30/1 Lyocell yarns were used in both the warp and weft directions of fabrics. The warp and weft densities of fabrics were 60 ends/cm and 20 ends/cm, respectively. The interlacements of fabrics affect many structural properties. The equivalent unit-cells of PW, TW and RW fabrics are different from each other. Therefore, the number of interlacements is also presented in Table 1 which was calculated for equivalent unit-cells of fabrics. As seen in Table 1, PW had a total of 24 interlacements (12 wefts and 12 warps), TW had a total of 12 interlacements (6 weft and 6 warp) and RW had a total of 16 interlacements (4 warp and 12 weft). PW, PT and PR fabrics were used since they had different interlacements to understand more clearly the effects of alkali pretreatment on tensile and tearing properties of Lyocell fabrics after abrasion.

Method

Sodium hydroxide (NaOH, 99%, Merck) was used for alkali pretreatment. The fabric samples were kept in alkali solution of 2, 5 and 7 mol/L at room temperature for 2 hours and stirred in every 30 minutes. The liquor ratio was used as 1:20. After that, the fabric samples were rinsed under tap water and then rinsed with distilled water. Acetic acid was used for adjusting the rinsing bath at pH 5. Rinsing with distilled-water was continued until the solution was neutralized and the fabric samples were dried in the laboratory environment.

Table 1. Specifications of Lyocell Woven Fabrics (Atıcı and Kaya, 2019)

Fabric type	Fabric view	Fabric interlacements	Crimp ratio (%)		Weight (g/m ²)	Thickness (mm)
			Warp	Weft		
PW			12.06 (±0.55)	10.02 (±0.81)	184.74 (±4.37)	0.44 (±0.02)
TW			9.54 (±0.78)	3.10 (±0.08)	182.53 (±3.23)	0.61 (±0.01)
RW			7.89 (±0.62)	4.44 (±0.00)	176.40 (±6.21)	0.58 (±0.01)

Fibrillation Tendency and Diameter Measurements of Lyocell Fibers

The Lyocell fibers' fibrillation tendency was evaluated by SEM images (ZEISS EVO® LS10). Diameter measurements of untreated and alkali pretreated Lyocell fibers were performed by using an image analysis software (BAB Bs200Doc) on SEM images.

Crimp and Density Measurements of Lyocell Fabrics After Alkali Pretreatment

The crimp and density measurements of Lyocell woven fabrics in warp and weft directions were performed after alkali pretreatment in accordance with ISO 7211-3 and TS 250 EN 1049-2 test standards, respectively.

Abrasion Test

The abrasion tests were performed using Martindale method according to ISO 12947-3 standard at 5000, 10000 and 15000 abrasion cycles. The tensile and tearing properties of abraded fabrics were examined. For this purpose, the sample dimension of abrasion test was adapted to the tensile and tearing tests. Fabric samples were placed on the holder and followed by polyurethane foam and metal coins with a diameter of 28 mm and a thickness of 2 mm instead of the conical piece (Bilisik and Yolacan, 2011). The excess parts of the fabric were folded, the sample holder was closed and made ready for testing. Lyocell fabrics were abraded in contact with standard wool fabrics.

Tensile and Tearing Tests

The tensile and tearing tests of the untreated and alkali pretreated Lyocell fabrics in warp and weft directions before and after abrasion were performed in a Hounsfield H5KS (UK) test device according to ISO 13934-1 and 13937-2 standards, respectively. After abrasion test, the width of samples was reduced to 32 mm by removing the yarn sets that were out of abraded region. The test speed was 100 mm/min for both tensile and tearing tests.

In this study, three different concentrations of alkali pretreatment were applied to three different weave types of Lyocell woven fabrics. The untreated fabric samples were mentioned as 0 mol/L. The tensile and tear strength results before and after abrasion of untreated and alkali pretreated Lyocell fabrics were compared by considering the both weave types of fabrics and alkali concentrations. In order to evaluate all these test results, analysis of variance (ANOVA) at 95% confidence interval was performed using SPSS V.24 package program. The Post-Hoc SNK (Student-Newman-Keuls) test was also performed to determine the change between subgroups.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Fibrillation Tendency and Diameter Measurement Results of Lyocell Fibres

SEM images of Lyocell fabrics are presented in Figure 1. Diameter measurement results of untreated and alkali pretreated Lyocell fibers are given in Figure 2.

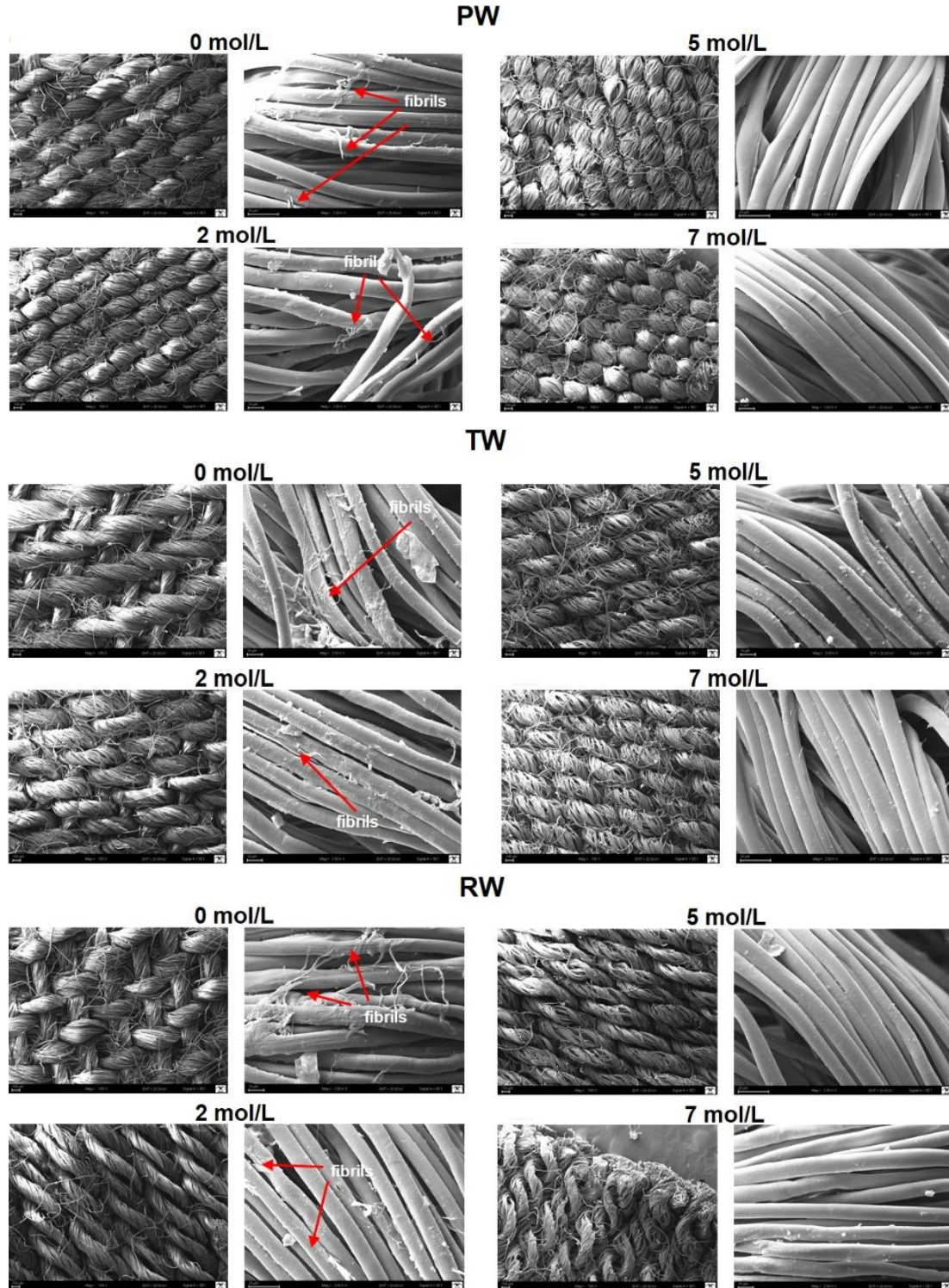


Figure 1. SEM Images of Lyocell Fabrics before and after Alkali Pretreatment (left images 100X, right images 2KX magnification) (Atıcı and Kaya, 2019)

A significant decrease was observed in fibrillation of Lyocell fibers at 2 mol/L alkali concentration, and fibrillation disappeared completely at 5 and 7 mol/L alkali concentrations. However, a noticeable change in the fabric appearance

was observed as the alkali concentration increased. It was determined that the yarn sets got closer to each other and the yarn structure and fabric surface appearance were adversely affected, especially at 5 and 7 mol/L alkali concentrations.

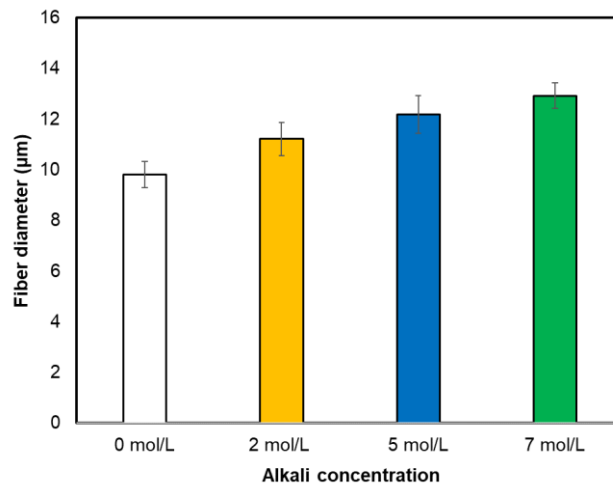


Figure 2. Diameter Measurement Results of Untreated and Alkali Pretreated Lyocell Fibers

The Lyocell fiber diameters increased by the increase in alkali concentrations because of the lateral swelling of fibers in alkali conditions (Manian et al., 2018; Xu et al., 2017; Atıcı and Kaya, 2019). The diameter of 7 mol/L alkali pretreated Lyocell fibres was about 25% higher than the untreated Lyocell fibers. Alkali pretreatment increased the volume of yarns in Lyocell fabrics due to the lateral fiber swelling and caused to damage on the twisted structure of yarns. The dense fibril appearance of untreated Lyocell fibers reduced at an alkali concentration of 2 mol/L. The fibrillation was not occurred at 5 and 7 mol/L NaOH concentrations due to lateral fiber swelling (Ozturk et al., 2006). More damages were occurred in the yarn/fabric structures of TW and RW fabric types with alkali pretreatment compared to the PW fabric due to the lower interlacements of TW and RW fabrics in which the yarns had more place to move and opening their twists.

Crimp and Density Measurement Results

The crimp and density results of untreated and alkali pretreated Lyocell fabrics in warp and weft directions are given in Figure 3.

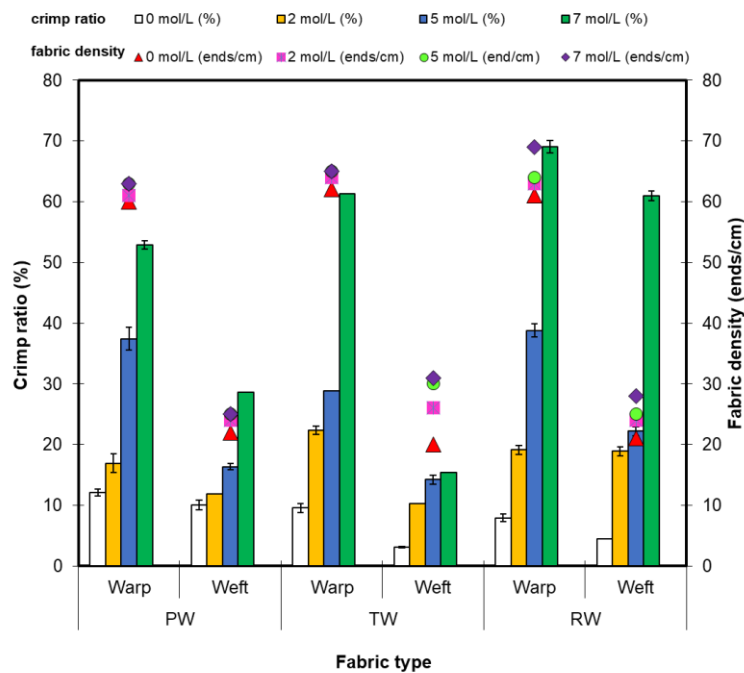


Figure 3. The Crimp and Density Results of Untreated and Alkali Pretreated Lyocell Fabrics

As the alkali concentration increased, both the warp and weft crimp ratios and fabric densities increased in all weave types. Alkali pretreatment increased the volume of yarns in fabrics due to the increase in Lyocell fiber diameter and opened the twist that caused shrinkage (Poongodi et al., 2021). Due to this shrinkage, the warp and weft crimp ratios and fabric densities increased.

The higher increase in warp/weft crimp ratios with alkali pretreatment occurred in RW weave type, followed by TW and PW because of the RW had the lowest warp interlacements (4), followed by TW (6) and PW (12). The yarns of fabric that had long floating interlacements were more crimped caused by the shrinkage with alkali pretreatment. The higher number of interlacements prevented the yarn movements and the intersection points resisted the shrinkage caused by alkali pretreatment.

Tensile Test Results

The breaking loads and breaking elongations of untreated and alkali pretreated Lyocell fabrics in warp and weft directions before and after abrasion are given in Figure 4.

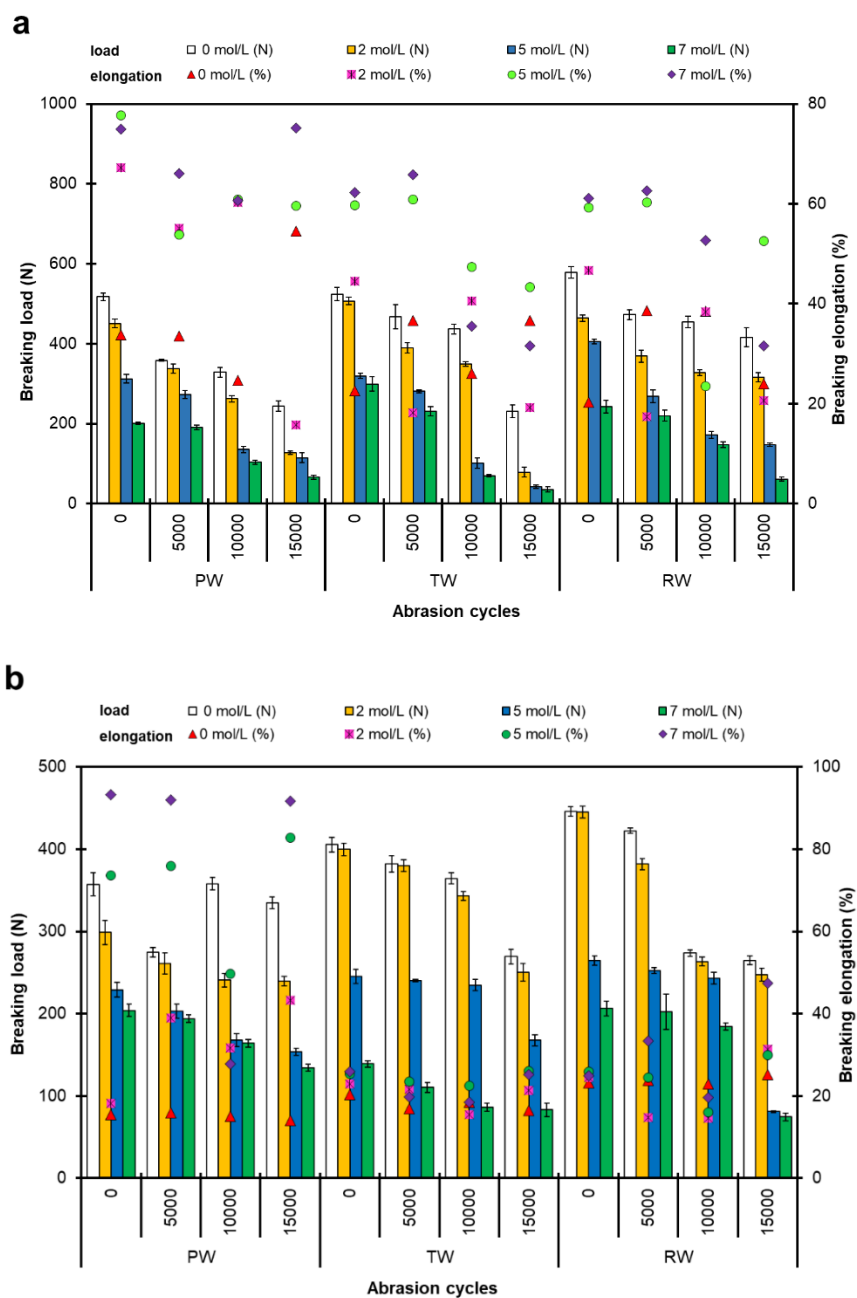


Figure 4. The Breaking Loads and Breaking Elongations of Untreated and Alkali Pretreated Lyocell Fabrics in Warp (a) and Weft (b) Directions before and after Abrasion

The warp directional breaking loads of untreated Lyocell fabrics were higher than the weft directional breaking loads before abrasion. This was because the warp density was higher than the weft density. As the alkali concentration increased the breaking loads decreased, although the warp and weft densities increased. The reduced carboxyl groups and crystallinity by alkali pretreatment in the Lyocell fiber caused to strength loss (Rojo et al., 2013; Ozturk et al., 2009; Yolacan, 2009). The breaking loads in the warp and weft directions decreased as the abrasion cycle increased in PW, TW and RW fabrics since the abrasive load caused fiber breakages and fiber entanglements. The difference between the warp directional breaking loads before and after abrasion was higher compare to the weft direction in TW fabric. The warp yarns of TW fabric had long floating interlacements on the fabric surface that were more severely damaged by exposing to abrasive load (Bilisik and Yolacan, 2011).

The warp directional breaking elongations of untreated Lyocell fabrics were higher than the weft directional breaking elongations since the warp crimp ratio was higher than the weft crimp ratio. Both the warp and weft directional breaking elongations increased by the increase in alkali concentrations since the increased crimp ratios due to the fabric shrinkage with alkali pretreatment. The warp and weft directional breaking elongations generally decreased with the increase in abrasions cycles since the abrasive load caused fiber breakages.

The ANOVA results for breaking loads, breaking elongations and tearing loads of Lyocell fabrics in warp and weft directions are given in Table 2. The alkali concentration, weave type and abrasion cycles were statistically significant on the warp/weft directional breaking loads and breaking elongations of Lyocell fabrics according to ANOVA results. The effects of interaction between alkali concentration and weave type, alkali concentration and abrasion cycles, weave type and abrasion cycles were statistically significant. The effects of interaction between all three variables were also significant for warp/weft breaking loads and breaking elongations. The alkali concentration had the highest effect on both the warp and weft directional breaking loads by considering F values of ANOVA results. Besides, the alkali concentration had the highest effect on warp directional breaking elongations while it was weave type for weft directional breaking elongation according to F values of ANOVA results.

The SNK results of breaking load, breaking elongation and tearing loads in the warp and weft directions are presented in Table 3. A significant difference was determined between the warp/weft directional breaking loads of the untreated and alkali pretreated fabrics in 2, 5 and 7 mol/L alkali concentrations. The highest warp directional breaking load was obtained in untreated fabrics while the lowest warp directional breaking load was obtained in 7 mol/L alkali pretreated fabrics. A significant difference was also determined between the warp/weft directional breaking loads of PW, TW, RW weave types. The PW fabric showed the lowest warp/weft directional breaking loads while RW showed the highest warp/weft directional breaking loads. The warp/weft directional breaking loads decreased with the increase in abrasions cycles in which the abrasive load caused damage on the yarn sets of fabrics.

Table 2. ANOVA Results of for Breaking Loads, Breaking Elongations and Tearing Loads in Warp and Weft Directions

Direction	Source	Breaking load (N)		Breaking elongation (%)		Tearing load (N)	
		F	P	F	P	F	P
Warp	Alkali concentration (A)	3696.805	0.000	1093.123	0.000	4002.540	0.000
	Weave type (B)	388.919	0.000	629.163	0.000	682.210	0.000
	Abrasion cycles (C)	2942.813	0.000	259.184	0.000	638.605	0.000
	A * B	50.250	0.000	34.839	0.000	19.870	0.000
	A * C	54.286	0.000	194.163	0.000	130.680	0.000
	B * C	98.834	0.000	20.689	0.000	47.967	0.000
	A * B * C	33.670	0.000	80.882	0.000	21.640	0.000
Weft	Alkali concentration (A)	4872.412	0.000	2651.729	0.000	9757.389	0.000
	Weave type	149.940	0.000	5769.804	0.000	2712.538	0.000
	Abrasion cycles (C)	1325.300	0.000	814.345	0.000	5790.028	0.000
	A * B	207.633	0.000	1596.608	0.000	197.897	0.000
	A * C	31.351	0.000	204.057	0.000	305.276	0.000
	B * C	182.222	0.000	227.076	0.000	457.212	0.000
	A * B * C	55.983	0.000	136.961	0.000	159.236	0.000

Table 3. SNK Results of Parameters on Breaking Load, Breaking Elongation and Tearing Load

Parameters		Breaking load (N)		Breaking elongation (%)		Tearing load (N)	
		Warp	Weft	Warp	Weft	Warp	Weft
		Alkali concentration	0 mol/L	419.05 a	346.05 a	32.45 d	18.96 d
	2 mol/L	331.68 b	312.49 b	36.99 c	24.88 c	18.88 b	29.57 b
	5 mol/L	214.46 c	206.79 c	54.91 b	39.64 b	15.12 c	21.11 c
	7 mol/L	155.54 d	148.44 d	56.66 a	43.26 a	11.97 d	16.71 d
Weave type	PW	251.39 c	238.32 c	54.60 a	48.68 a	16.33 c	21.85 c
	TW	272.72 b	256.25 b	40.68 b	21.25 b	19.43 b	30.15 b
	RW	316.43 a	265.77 a	40.48 b	25.11 b	22.54 a	33.68 a
Abrasion cycles	0	401.76 a	303.26 a	52.48 a	32.78 b	23.04 a	41.23 a
	5.000	321.49 b	275.25 b	47.42 b	33.41 b	21.01 b	30.09 b
	10.000	240.68 c	243.61 c	42.42 c	22.65 c	18.72 c	26.55 c
	15.000	156.81 d	191.66 d	38.69 d	37.90 a	14.95 d	16.37 d

A significant difference was determined between the warp/weft directional breaking elongations of untreated and alkali pretreated fabrics in 2, 5 and 7 mol/L alkali concentrations. As seen in Table 3, the warp/weft directional breaking elongations increased as the alkali concentrations increased due to the increased crimp ratios caused by alkali pretreatment. The warp/weft directional breaking elongations of PW fabric were significantly higher than that of the TW and RW fabrics while the warp/weft directional breaking elongations of TW and RW were close to each other and were not statistically different. The warp/weft directional breaking elongations decreased with the increase in abrasions cycles.

Tearing Test Results

The tearing loads of untreated and alkali pretreated Lyocell fabrics in warp and weft directions before and after abrasion are given in Figure 5. The weft directional tearing loads of untreated Lyocell fabrics were higher than the warp directional tearing loads before abrasion. This was because the warp densities of fabrics were higher than the weft densities. The higher fabric density prevented the shear of the yarns under tearing force, and thus it could be hard to resisting of the yarns against the tearing force together. The warp/weft tearing loads Lyocell fabrics decreased as the alkali concentration increased. Alkali pretreatment caused the both decreased fiber strength and increased fabric density. The increase in the warp/weft directional fabric density also caused a decrease in the tearing loads of PW, TW and RW fabrics. The tearing loads in warp and weft directions also decreased as the abrasions cycles increased. Abrasive load caused fiber breakages and fiber entanglement that greatly reduced the tear strength of Lyocell fabrics.

The alkali concentration, weave type and abrasion cycles were statistically significant on warp/weft directional tearing loads of Lyocell fabrics according to ANOVA results in Table 2. The effects of interaction between alkali concentration and weave type, alkali concentration and abrasion cycles, weave type and abrasion cycles were statistically significant on warp/weft directional tearing loads. The effects of interaction between all three variables were also significant. The alkali concentration had the highest effect on both warp and weft directional tearing loads by considering F values of ANOVA results. As seen in Table 3, a significant difference was determined between the warp/weft directional tearing loads of the untreated and alkali pretreated fabrics in 2, 5 and 7 mol/L alkali concentrations according to the SNK results. The highest warp/weft directional tearing load was obtained in untreated fabrics while the lowest warp/weft directional tearing load was obtained in 7 mol/L alkali pretreated fabrics. A significant difference was also determined between the warp/weft directional breaking loads of weave types. The PW showed the lowest warp/weft directional tearing load while RW showed the highest warp/weft directional tearing load. The warp/weft directional tearing loads decreased with the increase in abrasions cycles in which the abrasive load caused damage on the yarn sets of fabrics.

CONCLUSIONS

The influences of alkali pretreatment on tensile and tearing properties of Lyocell woven fabrics after abrasion were examined. Lyocell woven fabrics were designed in different weave patterns as 1/1 plain, 3/1 twill and 2/2 warp ribs. NaOH was used for alkali pretreatment in 2 mol/L, 5 mol/L and 7 mol/L concentrations.

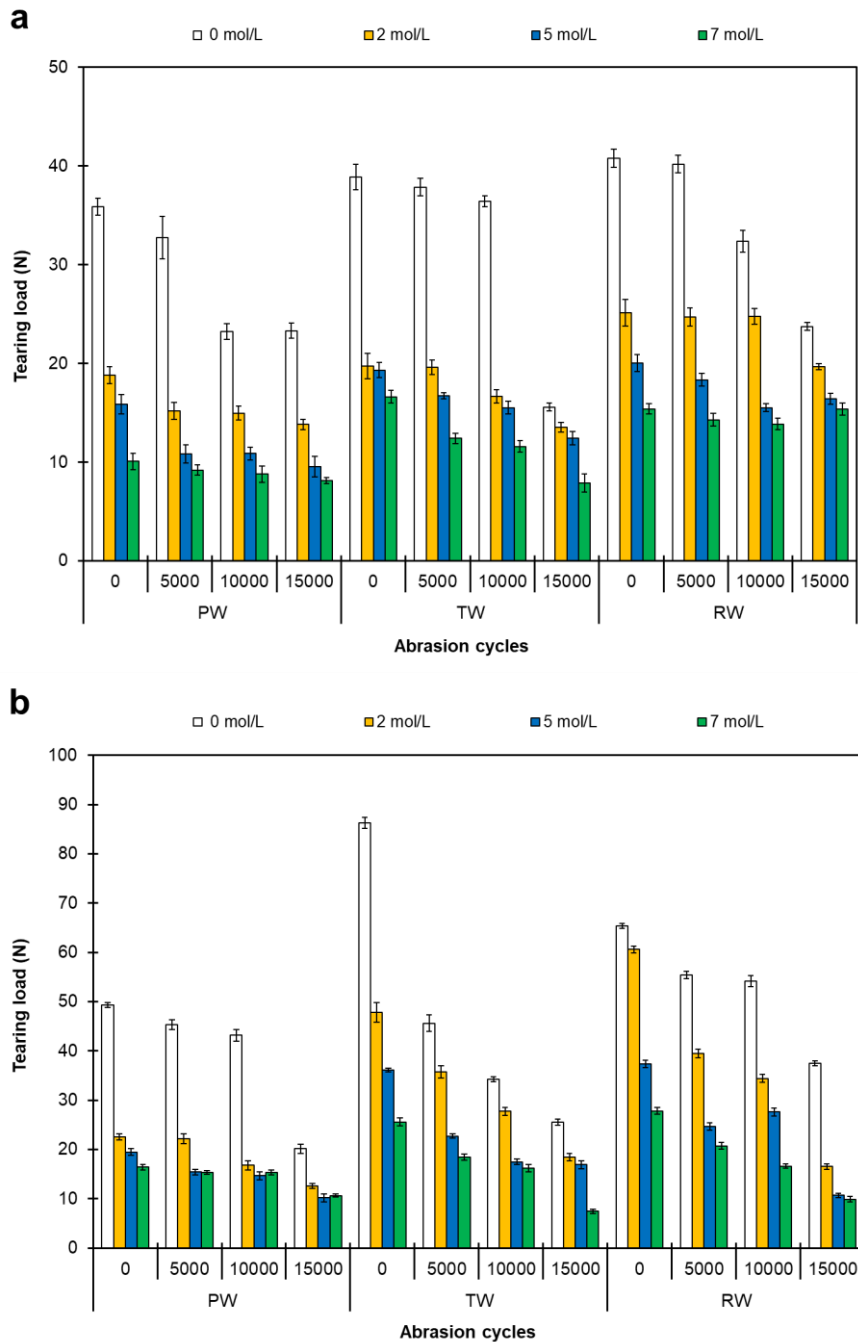


Figure 5. The Tearing Loads of Untreated and Alkali Pretreated Lyocell Fabrics in Warp (a) and Weft (b) Directions before and after Abrasion

The following conclusions are:

- Alkali pretreatment reduced fibrillation of Lyocell fibers. The dense fibril appearance of untreated Lyocell fibres greatly reduced at an alkali concentration of 2 mol/L and the fibrillation was not occur in 5 and 7 mol/L NaOH concentrations due to lateral fiber swelling. The lateral fiber swelling also caused the shrinkage because of the increased volume and damaged twisted structure of yarns (Poongodi et al., 2021).
- Both the warp and weft densities and crimp ratios increased as the alkali concentration increased in all weave types. The increase in warp/weft crimp ratios of ribs fabric was higher than that of the twill and plain fabrics because of the less number of interlacements in ribs fabric. The breaking and tearing loads of untreated Lyocell fabrics were higher than those of alkali pretreated fabrics since the reduced carboxyl groups and crystallinity by alkali pretreatment in the Lyocell fibers caused to strength loss (Rojo et al., 2013; Ozturk et

al., 2009; Yolacan, 2009). The abrasive load caused fiber breakages and fiber entanglements on fabrics and decreased the both breaking and tearing loads. The breaking elongations increased by the increase in alkali concentrations since the increased crimp ratios due to the fabric shrinkage with alkali pretreatment. The breaking elongations generally decreased with the increase in abrasion cycles since the abrasive load caused fibre breakages.

- The weave types that had long floating interlacings on the fabric surface were more severely damaged by exposing to abrasive load and resulted as more decreased strength.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financially supported by Kahramanmaraş Sutcu Imam University Scientific Research Projects Unit. Project number: 2017/7-176 YLS.

REFERENCES

- Atıcı, A., Kaya, G. (2019). Effects of alkali pretreatment on the appearance and structural properties of lyocell woven fabrics with different weave types, *Tekstil ve Mühendis*, 26, 113, 52-62.
- Bilisik, K., Yolacan, G. (2011). Tensile and tearing properties of newly developed structural denim fabrics after abrasion, *Fibers & Textiles in Eastern Europe*, 19(5), 54-59.
- Broadbent, A.D. (2001). *Basic Principles of Textile Coloration*, Bradford: Society of Dyers and Colorists.
- Franks, N.E., Varga, J.K. (1980). 4145532. Process for Making Precipitated Cellulose, *US Patent*.
- Gindl, W., Martinschitz, K.J., Boesecke, P., Keckes, J. (2006). Changes in the molecular orientation and tensile properties of uniaxially drawn cellulose films, *Biomacromolecules*, 7, 3146-3150.
- Jaturapiree, A., Manian, A.P., Lenninger, M., Bechtold, T. (2011). The Influence of alkali pretreatments in lyocell resin finishing- Changes in fiber accessibility to crosslinker and catalyst, *Carbohydrate Polymers*, 86, 612-620.
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H.P., Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material, *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393.
- Manian, A.P., Jaturapiree, A., Bechtold, T. (2018). Salt sorption on regenerated cellulosic fibers: electrokinetic measurements, *Cellulose*, 25, 3307-3314.
- Manian, A.P., Rous, M.A., Lenninger, M., Roeder, T., Schuster, K.C., Bechtold, T. (2008). The influence of alkali pretreatments in lyocell resin finishing - fiber structure, *Carbohydrate Polymers*, 71, 664-671.
- Manian, A.P., Rous, M.A., Schuster, K.C., Bechtold, T. (2006). The influence of alkali pretreatments in lyocell resin finishing- resin distribution and mechanical properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 100, 3596-3601.
- Nechwatal, A., Nicolai, M., Mieck, K.P., Heublein, B., Kuhne, G., Klemm, D. (1999). Studies on the wet fibrillation of lyocell fibers, *Angewandte Makromolekulare Chemie*, 271, 84-92.
- Ozturk, H.B., Okubayashi, S., Bechtold, T. (2006). Splitting tendency of cellulosic fibers - Part 1. The effect of shear force on mechanical stability of swollen Lyocell fibers, *Cellulose*, 13(4) 393-402.
- Ozturk, H.B., Potthast, A., Rosenau, T., Abu-Rous, M., MacNaughtan, B., Schuster, C., Mitchell, J.R., Bechtold, T. 2009. Changes in the intra- and inter-fibrillar structure of lyocell (Tencel®) fibers caused by NaOH treatment, *Cellulose*, 16, 37-52.
- Periyasamy, A.P. (2020). Effects of alkali pretreatment on lyocell woven fabric and its influence on pilling properties, *The Journal of The Textile Institute*, 111(6), 846-854.
- Poongodi, G.R., Sukumar, N., Subramnaiam, V., Radhalakshmi, Y.C. (2021). Effects of alkali treatment and strain hardening on the mechanical, dye uptake, and structural properties of regenerated cellulosic yarns, *Journal of Natural Fibers*, 18(1), 122-135.
- Renfrew, A.H.M., Phillips, D.A.S. (2003). Protection of lyocell fibers against fibrillation: Mode of action of the crosslinking agent 2,4-dichloro-6-(b-sulphatoethylsulphonyl) aniline-s-triazine, *Coloration Technology*, 119, 116-120.

Rojo, E., Alonso, M., Dominguez, J.C., Saz-Orozco, B.D., Oliet, M., Rodriguez, F. (2013). Alkali treatment of viscose cellulosic fibers from eucalyptus wood: Structural, morphological, and thermal analysis, *Journal of Applied Polymer Science*, 130, 2198-2204.

Siroky, J., Blackburn, R.S., Bechtold, T. (2011). Influence of fabric structure on sodium hydroxide release from woven lyocell, *Textile Research Journal*, 81(16), 1627-1637.

Umur, Y. (2010). The Influence of fibrillation on the strength values and elongation of the regenerated cellulosic fibers, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 121-133.

Xu, Y., Xu, Y., Yue, X. (2017). Changes of hydrogen bonding and aggregation structure of cellulose fiber due to microwave-assisted alkali treatment and its impacts on the application as fluff pulp, *Cellulose*, 24, 967-976.

Yolacan, G. (2009). Effects of Alkali Pretreatment on Dye Exhaustion, Color Values, Color Fastness, Tensile and Surface Properties of Lyocell Yarns, *Fibers and Polymers*, 10(5), 625-635.

Zhang, H., Shao, H., Hu, X. (2006). Effect of heat treatment on the structure and properties of lyocell fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 1738-1743.

Zhang, W., Okubayashi, S., Bechtold, T. (2005). Fibrillation tendency of cellulosic fibers-Part 3: Effects of alkali pretreatment of lyocell fiber, *Carbohydrate Polymers*, 59, 173-179.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.04.2023
Kabul Tarihi : 15.09.2023

Received Date : 07.04.2023
Accepted Date : 15.09.2023

Al İÇERİĞİNİN (CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMININ YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

INFLUENCE OF Al CONTENT ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF (CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) HIGH ENTROPY ALLOY

Gökhan POLAT^{1,2*} (ORCID: 0000-0003-0143-900X)
Tuğba Selcen ATALAY KALSEN¹ (ORCID: 0000-0001-5763-9196)

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye
²İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gökhan POLAT, gokhan.polat@ikc.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, farklı alüminyum içeriğine sahip (CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) alaşımları (x=5, 10, 20, 30 % at.) ark ergitme yöntemiyle üretilmiş ve 4 mm çapındaki silindirik bakır kalıp içerisine dökümü yapılmıştır. Elde edilen silindirik şekilde alaşımlar, XRD ve SEM ile yapısal olarak incelenmiş ve değişen oranlardaki Al ve Ni elementlerinin kristal yapıya, mikro yapıya ve mekanik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Alaşım içerisinde oluşan fazlar, Thermo-Calc yazılımı kullanılarak ve termodinamik yaklaşımlar sergilenerek deneysel olarak elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. Alaşımların sahip olduğu mekanik özellikleri tespit etmek amacıyla sertlik ve basma testleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar, alaşım içerisindeki Al miktarının %5 at.'den %30 at.'ye çıkmasıyla beraber, alaşımın temel kristal yapısının YMK yapıdan HMK'ye doğru geçiş yaptığını göstermiştir. Bununla beraber, alaşım içerisinde Al miktarının artması, mikro yapıda bir miktar AlNi intermetalik fazlarının da oluşmasına neden olmuştur. Al oranının artmasıyla hem kristal yapının değişmesi, hem de intermetalik fazların oluşması, alaşımın sertlik değerinin 146±3 HV'den 563±6 HV'ye kadar; akma dayanımının ise 193 MPa'dan 1260 MPa değerine kadar yükselmesini sağlamıştır. Yapısal analizler ve mekanik testler, (CoCrFe)₆₀Al₂₀Ni₂₀ YEA'sının mukavemet-süneklik dengesi açısından en umut verici alaşım olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek entropili alaşımlar, mekanik özellikler, sertlik, yapısal inceleme

ABSTRACT

In this study, (CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) (x=5, 10, 20, 30 at. %) alloys with different aluminum content were produced by arc melting method and casted into a 4 mm diameter cylindrical copper mold. The cylindrical alloys were structurally examined by XRD and SEM to investigate the effects of varying ratios of Al and Ni elements on the crystal structure, microstructure, and mechanical properties. The phases in the alloys determined by Thermo-Calc software and thermodynamic approaches were compared with the experimental results. The alloys were subjected to hardness and compression tests to determine mechanical properties. Experimental results showed that the crystal structure of the alloy shifted from FCC to BCC with increasing Al content from 5 at.% to 30 at.%. However, the increasing Al content caused the formation of some AlNi intermetallic phases in the microstructure. Both the change of the crystal structure and the formation of intermetallic phases with the rise of the Al ratio increase the hardness and yield strength of the alloy from 146±3 HV to 563±6 HV, from 193 MPa to 1260 MPa, respectively. Structural analyses and mechanical tests showed that (CoCrFe)₆₀Al₂₀Ni₂₀ HEA is the most promising alloy in terms of strength and ductility trade-off.

Keywords: High entropy alloys, mechanical properties, hardness, structural investigation

GİRİŞ

Yapısal uygulamalar için kullanılacak olan malzemeler, genellikle yüksek mukavemet, iyi süneklik, mükemmel kırılma tokluğu ve yüksek sürünme ve aşınma direnci gibi olağanüstü mekanik özellikler gerektirmektedir (Z. Li vd., 2019). Bu malzemelerin özellikle mukavemet ve süneklik kombinasyonunun sağlanması önemli bir unsur haline gelmektedir. Bu tür malzemelerin mekanik özelliğindeki iyileşmeler, onların kristal yapılarına, kimyasal bileşimlerine ve mikro yapılarına bağlı olarak değişmektedir. Son yıllarda yapılan birçok araştırma, yeni alaşım sistemlerinin geliştirilmesi yoluyla mukavemet-süneklik sinerjisine ulaşmaya odaklanmıştır. Bu tür sistemleri geliştirmeye yönelik geleneksel yaklaşım, bir veya iki elementi bir matris olarak (alüminyum, kobalt, demir veya nikel bazlı gibi) organize etmeye ve ardından mukavemeti ve sünekliği optimize etmek için diğer alaşım elementlerinin eklenmesine dayanmaktadır (George vd., 2019). Ancak bu geleneksel yaklaşım, alaşım sistemlerinin sadece faz diyagramının köşe noktalarıyla sınırlanmasına sebep olmakta ve tasarım değişkenliğini, uygulama verimliliğini önemli ölçüde kısıtlamaktadır. Alaşım sistemlerinde kompozisyon değişkenliğinin artırılması ve faz diyagramlarının merkez noktalarına doğru geçiş yapılması temel hedef haline gelmektedir (Murty vd., 2019; Miracle ve Senkov, 2017).

Alaşımın sadece sınırlı bir bileşim aralığında kalmasının üstesinden gelmek ve yepyeni malzeme özellikleri elde etmek amacıyla, Yeh vd. (2004) tarafından yüksek entropili alaşımı (YEA) olarak bilinen yeni bir alaşım konsepti ortaya atılmıştır. Bu yeni nesil alaşım sistemleri, yapısında en az 5 veya daha fazla element barındıran ve her bir elementin atomik olarak %5-35 orana sahip olduğu sistemler olarak tanımlanmaktadır (Yeh vd., 2004). Bu alaşımların bünyesindeki elementlerin atomik boyutlarındaki, kristal yapısındaki ve kimyasal bağlarındaki farklılık, ciddi kafes bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum, dislokasyon hareketine karşı daha yüksek direnç sağlamakta ve yüksek entropili alaşımlarda daha yüksek mukavemet değerlerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır. YEA'larda katı çözeltilerle mukavemet kazanımı, geleneksel alaşım sistemlerinden daha etkilidir (Yeh, 2006). Elde edilen bu durumun, beş veya daha fazla alaşım elementinin arasındaki karşılıklı etkileşimlerin de kokteyl etkilerinden kaynaklandığı bildirilmektedir. Sonuç olarak, YEA'lar, geleneksel alaşım tasarım yaklaşımıyla mümkün olmayan ve çeşitli yapısal uygulamalar için uygun bir aday olarak kabul edilen olağanüstü mekanik özellik kombinasyonunun elde edilmesini mümkün hale getirmiştir (Miracle vd., 2014; Polat vd., 2020; Yeh, 2006).

YEA'lar ilk keşfedildiklerinden beri farklı birçok alaşım kombinasyonu üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yaygın olarak bu alaşım sistemlerinin arasında AlCrFeCoNi YEA'sı yer almaktadır (Cai, Ao, vd., 2019; Cai, Zhu, vd., 2019; Bönisch vd., 2018). Bu alaşım, yaklaşık 1250 MPa akma dayanımına ve 2004 MPa basma dayanımına sahiptir (Tokarewicz ve Grządka-Dahlke, 2021). AlCoCrFeNi alaşımının yapısı ve mekanik özellikleri, büyük ölçüde alaşım üretim teknolojisine, üretim parametrelerine ve ısıl işlemin türüne bağlıdır. Ayrıca, tüm alaşımın yapısı ve özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için belirli elementlerin yüzdesini değiştirmek de çok yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. AlCoCrFeNi YEA'sında da özellikle Al içeriği değiştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiş ve Al içeriğinin kademeleri olarak artırılmasının yapıyı yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdan hacim merkezli kübik (HMK) yapıya dönüştürdüğü belirtilmiştir (Tong vd., 2005). Bununla beraber, Al ilavesinin alaşımın dayanımına da olumlu etki ettiği gösterilmiştir (W. R. Wang vd., 2012b).

Manzoni vd. (2013) tarafından ergitme yöntemiyle üretilen AlCoCrFeNi YEA'sında dendritik bir yapının hakim olduğu tespit edilmiştir. Geçirimsiz elektron mikroskopu ile yapılan detaylı incelemede, dendritlerin içerisinde Al-Ni açısından zengin bir matrisin ve Cr-Fe açısından zengin çökeltilerin olduğu tespit edilmiştir (Manzoni vd., 2013). Al-Ni içeriğince zengin fazın B2 fazına sahip olması sebebiyle, yumuşak Cr-Fe-Ni fazı içerisinde dağılmasıyla yapıya mukavemet kazandırdığı ifade edilmektedir (Sistla vd., 2015). Örneğin Diao vd. (2019) ergitme yöntemiyle üretilen ısıl işlem uyguladıkları Al_{0.3}CoCrFeNi YEA'sında B2 fazının çekme dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmada, YMK matris içerisinde oluşan B2 fazlarından dolayı akma dayanımının 145 MPa'dan 300 MPa'ya yükseldiği belirtilmiştir (Diao vd., 2019). Ayrıca, bu çalışmaya benzer şekilde, yapıda oluşan farklı ikincil fazların da yine mukavemeti artırıcı rol oynadığı görülmektedir. Zhang vd. (2018) vakum ark ergitme yöntemiyle Ni_{47.7}Co_{17.5}Cr₁₀Fe_{9.3}Al_{7.5}Ti₇Mo₁ YEA'sını üretmiş ve dökülmüş haldeki özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan inceleme neticesinde, YMK kristal yapısına sahip bu alaşımın mikroyapısında homojen halde dağılmış olan L12 fazlarından dolayı akma dayanımının 899 MPa, süneklik değerinin ise %14,3 olduğu gösterilmiştir (Zhang vd., 2018).

Bu çalışmada, (CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) YEA'ları vakum ark ergitme metodu ile üretilmiş ve yapıdaki Al ve Ni oranı değişiminin hem yapıdaki faz değişimlerine olan etkisi, hem de meydana gelen faz değişiminin mekanik özelliklere

olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, YEA'lar içerisindeki Al miktarının artmasıyla beraber alaşımın mekanik özelliklerinde önemli ölçüde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir.

MATERYAL METOT

Saflikları ağırlıkça % 99,5'ten yüksek olan Co, Cr, Fe, Al ve Ni parça halindeki saf elementler başlangıç malzemeleri olarak kullanılmıştır. Bu elementler, uygun oranlarda, hassas bir terazi kullanılarak toplam 2 gramlık karışım elde edilmek üzere tartılmıştır. Böylece, Tablo 1'de verilen nominal bileşimlere sahip $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ ($x=5, 10, 20, 30$ % at.) YEA'lar için element karışımı elde edilmiştir. Bu alaşım sisteminde, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_5\text{Ni}_{35}$, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{30}$, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}$ ve $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_{30}\text{Ni}_{10}$ numuneleri sırasıyla, Al5, Al10, Al20 ve Al30 olarak isimlendirilmiştir.

Tablo 1. Bu Çalışmada Üretilen YEA'ların Nominal Bileşimleri

YEA	% at.				
	Co	Cr	Fe	Al	Ni
Al5	20	20	20	5	35
Al10	20	20	20	10	30
Al20	20	20	20	20	20
Al30	20	20	20	30	10

Elde edilen karışım, Edmund Buhler MAM-1 marka bakır hazneli vakum ark ergitme fırını kullanılarak ergitilmiştir. Ergitme işlemi, Ar atmosferi altında ve 5-8 mbar basınçta gerçekleştirilmiş ve kimyasal homojenliği sağlamak amacıyla külçeler en az üç kez ters düz edilerek ergitilmiştir. Homojen hale getirilen külçeler, ergitme sistemi ile kompakt halde bulunan emişli döküm aparatı yardımıyla 4 mm su soğutmalı bakır kalıplara dökülerek silindirik şekilli numuneler üretilmiştir.

Numunelerin bünyesindeki fazları tespit etmek amacıyla Cu-K α ışınması kullanılarak PANalytical EMPYREAN X-ışını difraktometresi (XRD) yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen XRD desenleri, ICDD kütüphanesinde bulunan fazlarla eşleştirilerek, kristal yapısı ve pik açıları en iyi eşleşen mevcut fazlar bulunup YEA'ların kristal yapıları tespit edilmiştir.

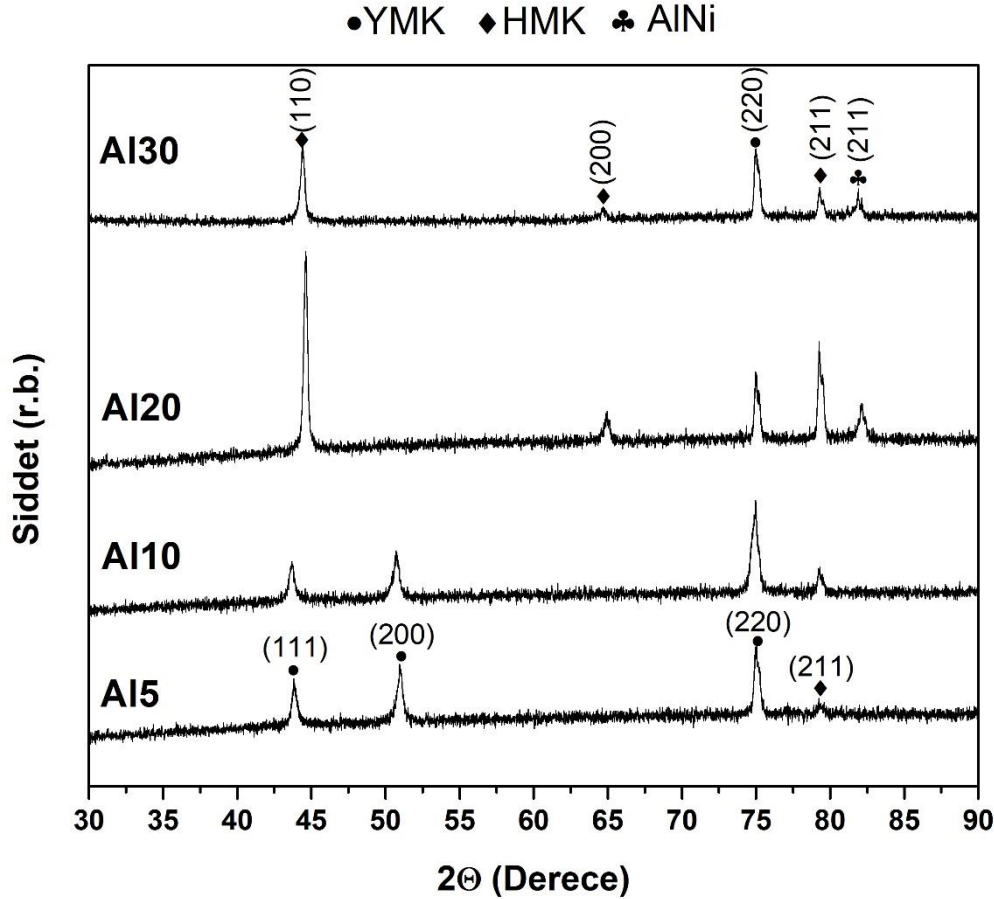
Mikroyapısal analizler için silindirik numuneler disk şeklinde parçalara kesilerek bakalit içerisine alınmış ve numuneler zımparalama, elmas pasta ile parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. En son ayna görünümünde bir numune yüzeyi elde edildikten sonra, numunede mikroyapısal bir kontrast elde etmek amacıyla kral suyu içerisinde 5-10 dakika aralığında dağlama işlemi yapılmıştır. Metalografik hazırlama neticesinde hazır hale getirilen numuneler, Hitachi SU1510 marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Oxford Instruments x-act marka dedektör kullanılarak mikroyapısal ve elementel analizler uygulanmıştır.

Numunelerin sertliğini ölçmek amacıyla Emcotest - Durascan G5 cihazı kullanılarak Vickers mikrosertlik (HV) yöntemi uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri 4.903 N (0.5 kgf) yük ve 10 saniye süreyle gerçekleştirilmiş, bir numuneden en az 5'er farklı bölgeden sertlik alınmış ve her numunenin sertlik değeri bu ölçümlerin ortalaması olarak ele alınmıştır. Silindir formundaki YEA'ların basma yükü altında mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla basma testleri ASTM E9-09 standardına göre 10 ton kapasiteli INSTRON 5582 Üniversal Test Cihazı ile 10⁻⁴ sn⁻¹ gerinim hızında ekstansometresiz olarak yapılmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

$(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA'larının XRD desenleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Düşük oranlarda Al içeren Al5 ve Al10 numunelerinde tek fazlı YMK kristal yapısının yapıda baskın olduğu görülmektedir. Ancak, XRD deseninde 79,30° dolaylarında HMK kristal yapısına ait olduğu tespit edilen ilave bir faz da görülmektedir. Bu durum, katılma esnasında meydana gelen faz ayrışmasından kaynaklı olabileceğini işaret etmektedir (T. Yang vd., 2015). Yang vd. (2015) ark ergitme metodunu kullanarak yapmış oldukları bir çalışmada, Al elementinin $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ YEA'sına olan etkisini incelemişlerdir. Yapılan bu çalışma neticesinde, çökelti konsantrasyonu yüksek olan bölgelerin Fe ve Cr, diğer bölgelerin ise Al ve Ni bakımından zengin olduğu tespit edilmiştir. Bu durum ise, çökeltilerin Fe, Cr bakımından zengin olabileceğini, matrisin ise Al ve Ni bakımından zengin olduğunu gösterir. Neticede, bu alaşımın XRD desenlerinde YMK ve HMK fazlarının bir arada bulunduğu tespit edilmiştir (T. Yang vd., 2015). Dolayısıyla, Al5 ve Al10 numuneleri her ne kadar tek fazlı bir YMK yapı görünse de, yapıda az miktarda HMK fazlarının da olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 1’de görüldüğü üzere, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA’sının içerisindeki Al oranının Ni elementine kıyasla daha da artırılması, mikroyapıda daha baskın oranda HMK fazının oluşmasına neden olmaktadır. Böylece Al20 ve Al30 YEA’larının temel olarak yapısında neredeyse tek fazlı bir HMK yapısı barındırmasıyla beraber, bir miktar ikincil fazların da olduğu tespit edilmiştir. X’Pert HighScore Plus yazılımı kullanılarak yapılan faz eşleştirmeleri sonucunda, yapıdaki ikincil fazların HMK ve AlNi fazlarının kırınım açlarına denk geldiği tespit edilmiştir. Elde edilen bu fazlar, daha önce benzer alaşım sistemi üzerinde yapılan çalışmalar ile eşleştiğini göstermektedir (Sistla vd., 2015; T. Yang vd., 2015; W. R. Wang vd., 2012a).



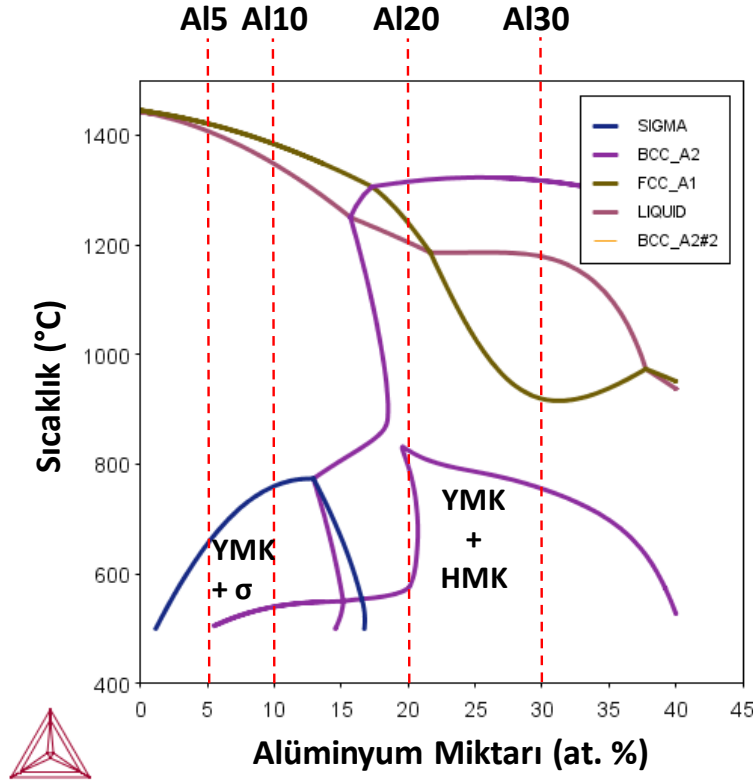
Şekil 1. Dökülmüş Haldeki YEA’ların XRD Desenleri

Thermo-Calc yazılımı kullanılarak elde edilen $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA’sının faz diyagramı Şekil 2’de verilmiştir. Bu faz diyagramı incelendiğinde, yapıdaki Al miktarı %5 ve %10 at. olan alaşımlarda YMK temel fazına ilaveten, bir miktar sigma (σ) fazının da bulunduğu görülmektedir. Bu alaşımlar içerisinde temel olarak YMK fazının termodinamik hesaplamalar (Tablo 2) neticesinde beklendiği bir gerçektir. Ancak daha detaylı termodinamik verilere, yani Gibbs minimizasyon stratejisine bağlı çalışan Thermo-Calc yazılım sonucunda ilave fazlar görmek de mümkün olmaktadır. Nitekim, yapıda ilave olarak elde edilen σ fazı intermetalik bir bileşik olup ve özellikle ısı işlemler neticesinde YEA’larda sıklıkla görülmektedir (X. J. Wang vd., 2021). Al miktarı %20 at.’nin üstüne çıkarıldığında, yapıdaki σ fazının yerine YMK ve HMK karışık fazlarının oluştuğu Şekil 2’de görülmektedir. HMK fazlarının oluşmasını tetikleyen unsur ise alaşımın toplam değerlik elektron konsantrasyonu (DEK) değerine dayanmaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda, alaşımın DEK değerinin 8 dolaylarında veya daha büyük olması durumunda YMK kristal yapısı beklendiği gösterilmiştir. DEK değerinin 8’in altına inmesiyle beraber alaşımların iç yapısında HMK kristal yapısının da oluşmaya başladığı ifade edilmektedir (Polat vd., 2020; Guo vd., 2011). Dolayısıyla, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA’sında Al artmasıyla beraber alaşımın DEK değerinin 8,3’ten 6,5’e kadar düştüğü Tablo 2’de gösterilmiştir. Yani en yüksek oranda Al içeren Al30 numunesinde, diğer alaşımlara kıyasla daha yüksek oranda HMK içeren bir mikroyapının oluşması beklenmektedir. Wang vd. (2009) Al miktarının artması ile beraber, Al elementinin yüksek atomik yarıçapı sebebiyle kafeste distorsiyon meydana geldiğini ve bu distorsiyon enerjisini düşürmek için yapının daha az paketlenme verimliliği olan HMK yapıya dönüştüğünü belirtmişlerdir. Bunun yanı

sıra, literatürde daha önce yapılan benzer çalışmalarda da yine Al miktarının artmasıyla beraber, yapıda HMK fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir (C. Li vd., 2010).

Tablo 2. $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA'sının Thermo-Fiziksel Hesaplama Sonuçları

YEA	Yoğunluk (g/cm ³)	δ (%)	$\Delta H_{\text{krş}}$ (kJ/mol)	DEK	$\Delta S_{\text{krş}}$ (kJ/mol.K)	T _e (K)	Beklenen Kristal Yapı
A15	7,87	2,62	-6,62	8,3	12,33	1792	YMK
A10	7,47	3,21	-8,96	7,9	12,95	1753	YMK+HMK
A120	6,71	4,06	-12,32	7,2	13,38	1674	YMK+HMK
A130	6,02	4,66	-13,92	6,5	12,95	1594	HMK

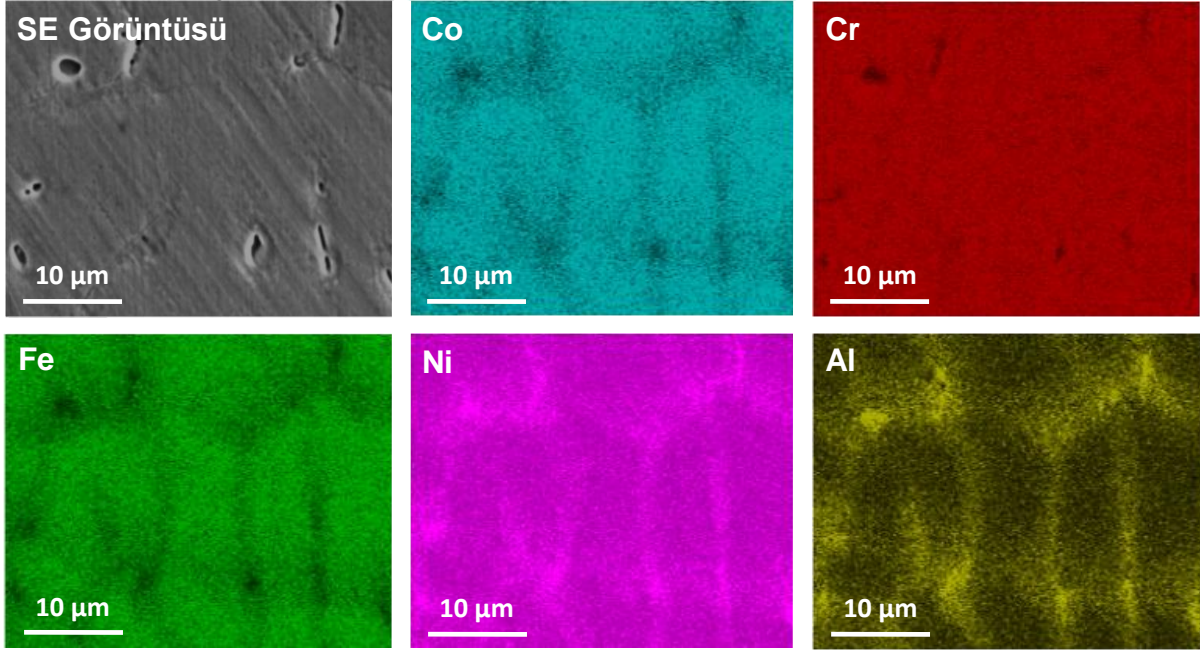


Şekil 2. Thermo-Calc Yazılımı ile Oluşturulan $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA'sının Faz Diyagramı

A110 YEA'sına ait SEM EDS haritalama görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Bu görüntüden anlaşılacağı üzere, yapıda homojen bir şekilde dağılan ve matrisi oluşturan Co, Cr ve Fe bakımında zengin bir bölge ile tane sınırlarına doğru ayrılmış Al ve Ni bakımınca zengin ikincil bir bölgenin olduğu görülmektedir. Co, Cr ve Fe içeren homojen matrisin oluşumu, bu elementler arasında eş atomik oran varsayım yapıldığında, sıfıra yakın bir değer olarak hesaplanan -2,67 kJ/mol karışım entalpisi ($\Delta H_{\text{krş}}$) ve YEA'lar için katı çözelti oluşumu için oldukça ideal olan %1,7 olan atomik çap farklılığından δ (%) kaynaklanmaktadır (Polat vd., 2022; Tripathy vd., 2018; X. Yang ve Zhang, 2012). Elde edilen haritalama görüntüleri incelendiğinde, Al ve Ni elementlerinin tane sınırlarına doğru ayrıştığı görülmektedir. Bu durum ise Al ve Ni elementlerinin -22 kJ/mol değerindeki ikili $\Delta H_{\text{krş}}$ değerinden kaynaklanmaktadır. Bu değer bu denli düşük olması, bu iki elementin kendi arasında bağ kurma eğilimini göstermektedir (Polat vd., 2020; Takeuchi ve Inoue, 2005). Benzer şekilde, Kao vd. (2009) ve Wang vd. (2008) tarafından yapılan çalışmalarda da Al-Co-Cr-Fe-Ni elementlerinden oluşan YEA'da Al-Ni elementlerince zengin fazlar tespit edilmiş, bu fazların Al ve Ni arasındaki nispeten yüksek karışım entalpisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Tablo 2'de görüldüğü üzere, A110 numunesinin teorik yoğunluk değeri 7,47 gr/cm³ çıkmaktadır. Ark ergitme sonucunda elde edilen silindirik numuneye Arşimet prensibi ile yoğunluk testi yapıldığında, numunenin gerçek yoğunluğu ise 7,57 gr/cm³ çıkmaktadır. Bu değer, teorik değere oldukça yakın bir değer olup iki değer arasında yaklaşık %1,3 kadar bir fark bulunmaktadır. Teorik ve deneysel bir çalışmada bu denli yakın değerler, birbirini doğrular niteliktedir. Ancak Şekil 3'te görüldüğü üzere, numunenin içyapısında, katılama esnasındaki çekme boşluklarından kaynaklı gözenekler mevcuttur. Her ne kadar numunenin görüntü alınan bölgesinde gözenekler

görünse de, teorik ve deneysel yoğunluğun birbirine çok yakın olması sebebiyle, bu gözeneklerin numunenin yoğunluğunu önemli ölçüde etkilemediği anlaşılmaktadır. Bu gibi alaşım sistemlerinde oluşan mikro gözenekler, bileşimdeki elementlerin türüne ve miktarına bağlı olarak değişmesi beklenmektedir. Genel olarak eş üretim koşulları baz alındığında, katılaşıma aralığını artıran elementlerin ilavesi, bu mikro gözeneklerin de artmasını tetiklemektedir (Han, 2008).



Şekil 3. Al10 Numunesinin İkincil Elektron (SE) Görüntüsü ve EDS Haritalaması

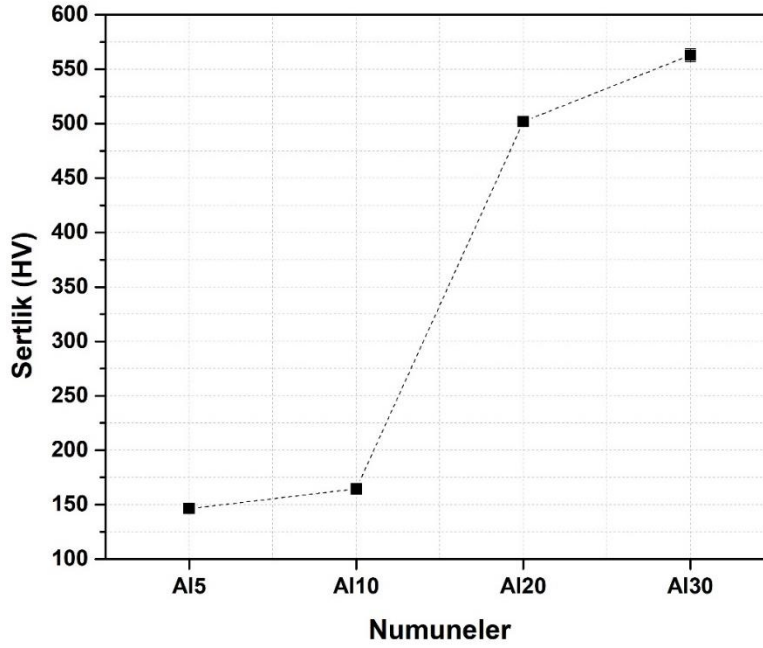
(CoCrFe)₆₀Al_xNi_(40-x) YEA'sının Vickers sertlik değişimi Şekil 4'te gösterilmektedir. Yapısında en az oranda Al içeren Al5 alaşımının sertliği 146±3 HV olarak ölçülmüştür. Bu alaşımın sertliğinin en düşük çıkmasının temel sebebi, yapısında bulunun yoğun miktardaki yumuşak YMK yapısındaki kaynaklanmaktadır (Guo vd., 2013). Ancak yapıdaki Al miktarının kademeli %30 at. (Al30 numunesi) değerine kadar artmasıyla beraber, alaşımın sertlik değerinin de kademeli olarak 563±6 HV'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Bu çalışmada, Al oranının artmasıyla beraber elde edilen yüksek sertlik değeri, kademeli Al ilavesi ile mikroyapıdaki kristal yapının YMK'den HMK'ye dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Shiratori vd. (2016) tarafından yürütülen bir çalışmada, alaşım içerisinde bulunan HMK fazının sertliğinin, YMK fazına kıyasla daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Bu sebeple, alaşım içerisine kademeli olarak ilave edilen Al miktarı, alaşımın sertliğinde de önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Benzer şekilde Geanta vd. (2018) tarafından yapılan Al_xCrFeCoNi YEA'sında Al miktarının, alaşım sertliği üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada, Al miktarının artması ile YMK'ye göre daha sert HMK yapıların oluştuğu ve neticesinde alaşım sertliğinin arttığı belirtilmiştir.

Tablo 3. Atomik Çiftlerin Miedema Model ile Hesaplanmış $\Delta H_{krş}$ Değerleri (kJ/mol) (Takeuchi ve Inoue, 2005)

	Co	Cr	Fe	Al	Ni
Co	0	-4	-1	-19	0
Cr		0	-1	-10	-7
Fe			0	-11	-2
Al				0	-22
Ni					0

Bununla beraber, Al–Ni, Al–Co, Al–Fe ve Al–Cr'nin $\Delta H_{krş}$ değerlerinin Cr–Ni, Cr–Co, Cr–Fe, Co–Fe, Ni–Fe ve Co–Ni ikili bileşenlerin $\Delta H_{krş}$ değerlerinden daha negatif değerlere sahip olduğu Tablo 3'te verilmiştir (Takeuchi ve Inoue, 2005). Bu sonuç, Al elementinin alaşımdaki diğer elementlerle bir araya gelme kuvvetinin, diğer elementlere kıyasla daha güçlü olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, Al elementinin atomik yarıçapı, alaşımdaki diğer elementlerden daha yüksek bir değere sahiptir. Böylece alaşım içerisindeki Al içeriğinin artmasıyla beraber, kristal kafesindeki distorsiyon da artmaktadır. Daha büyük bir atomik yarıçapa sahip Al, kafes bölgelerini işgal ettiğinden,

kafes distorsiyon enerjisi önemli ölçüde artacak ve katı çözelti mukavemetlendirmesinin etkisi de artacaktır. Netice itibariyle, yüksek oranda Al içeren alaşımların sertliği de, diğer alaşımlara kıyasla önemli ölçüde artmaktadır (C. Li vd., 2009).

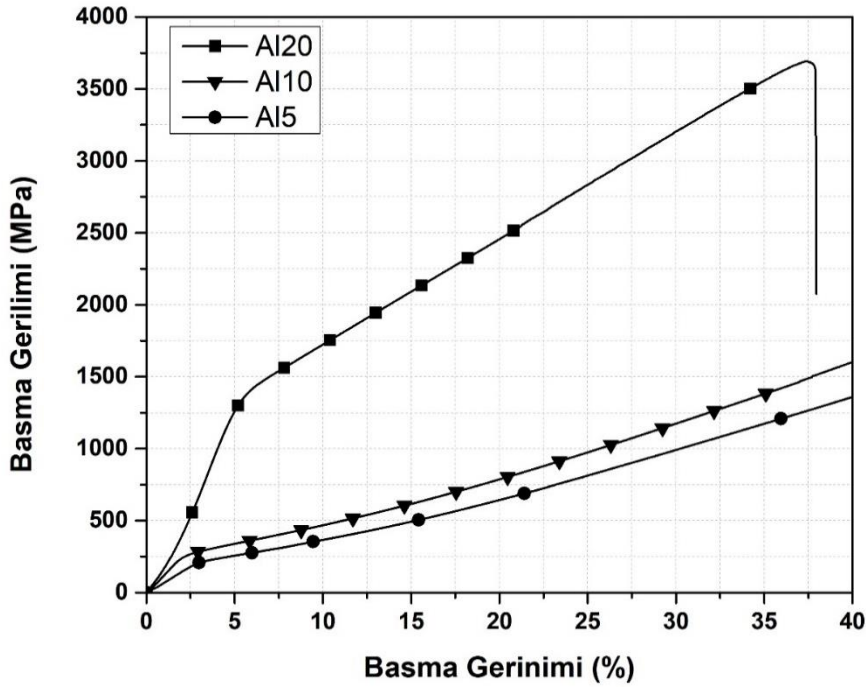


Şekil 4. YEA'ların Kompozisyona Bağlı Sertlik Değişimi

Döküm numunelerinde mekanik özellikler hem alaşımın tane boyutundan, hem de yapıda oluşan gözeneklerden doğrudan etkilenmektedir. Genel olarak, alaşımın tane boyutunun küçülmesi mekanik özellikleri iyileştirirken, artan gözenek miktarının, özellikle çekme testi esnasında ve malzemenin mühendislik uygulamalarında özelliklerini olumsuz etkilediği bilinmektedir. Buna ilave olarak, döküm numunelerinde meydana gelen gözenekli yapıların çekme testi esnasında çatlak ilerleme noktaları olarak rol oynamasından dolayı, alaşımın mekanik özelliklerinin incelenmesinde doğru bilgi vermemektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, gözenekli yapının mekanik özellik tespitine olan etkisini en aza indirmek amacıyla basma testi ile daha doğru sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA'sının basma gerilim-gerinim eğrileri Şekil 5'te verilmiştir. Bu alaşımlardan Al30 numunesi yapısındaki yoğun HMK fazıyla beraber bulunan AlNi intermetalik fazından dolayı oldukça kırılmalı bir özellik sergilemiş olup numune hazırlama esnasında dahi parçalanma eğilimi göstermiştir. Bu sebeple, Al30 numunesi için basma testi uygulamak mümkün olmamıştır. Diğer yandan, basma testleri için uygun özellik sergileyen Al5, Al10 ve Al20 numuneleri için sırasıyla 193 MPa, 230 MPa ve 1260 MPa akma dayanmaları elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, alaşım içerisindeki Al miktarının artmasıyla beraber alaşımların akma dayanımı önemli ölçüde artmaktadır. Elde edilen bu artışın sebepleri sertlik değerindeki artışla paralel sonuçlara dayanmaktadır. Yani yapıda yoğun miktardaki HMK ile beraber AlNi intermetaliklerinin oluşması, kristal yapıda distorsiyon meydana gelmesi, Al elementinin diğer elementlerle daha güçlü bir bağ kurması alaşımın akma dayanımının da artmasına sebep olmaktadır (Liu vd., 2021; Sohn vd., 2019; Beyramali Kiviy vd., 2017). Bununla beraber, yapısında daha yoğun şekilde HMK içeren numunelerin, YMK içeren numunelere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım göstermesini tetikleyen unsurlardan biri de, HMK yapılarıdaki aktif kayma düzlemi sayısının daha az olmasıdır (Lim ve Huh, 2022). Dolayısıyla, genel olarak Al elementinin yapıda artırılıp Ni elementinin yerini almasıyla beraber alaşımın mekanik özelliklerinde ciddi bir artış sağlanmaktadır. Alaşımların sünekliği ise mekanik özellik artışına tam ters olarak davranış sergilemektedir.

Şekil 5'te görüleceği üzere, Al5 ve Al10 numuneleri için bir noktadan sonra gerinim sertleşmesi meydana gelip malzemeler kırılmadan basma testleri devam ederken, oldukça yüksek mekanik özelliklere sahip olan Al20 numunesi yaklaşık %35 gibi bir basma gerinimi değerinde kırılmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlara paralel olarak; Wang vd. (2008), eş atomik oranlara sahip AlCrFeCoNi HEA'sında 1250 MPa akma dayanımı ve %32,7 basma gerinimi elde etmişlerdir. Buna ek olarak, Joseph vd. (2015) Al miktarı arttıkça basma dayanımının arttığını ancak sünekliğin azaldığını belirtmişlerdir. Yani bu gibi bir alaşım sisteminde mekanik özelliklerin iyileştirilmesi bileşimin ayarlanmasıyla mümkün olsa da, bir noktadan sonra süneklik değerlerinin düşmesine de yol açabilmektedir (Polat vd., 2020). Bu durum ise malzemelerin ileriki uygulamalar için şekillendirme prosesleri için zorluk yaratmaktadır.

Dolayısıyla, optimum bir alaşım bileşimi seçilerek mekanik özelliklerde iyileştirmeler yapılırken, süneklik değerlerin de düşüşleri engellenmeli veya uygulamalarda zorluğa sebep olmayacak şekilde ayarlanmalıdır.



Şekil 5. YEA'ların Basma Gerilim-Gerinim Eğrileri

SONUÇLAR

Bu çalışmada, atomik olarak farklı Al ve Ni oranlarının, CoCrNi YEA matrisine olan etkisini incelemek amacıyla $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ ($x=5, 10, 20, 30$ % at.) alaşımları üretilmiş ve yapısal ve mekanik olarak karakterizasyon testleri uygulanmıştır. Alaşım içerisine eklenen farklı oranlardaki Al elementinin alaşımın kristal yapısını değiştirdiği ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerinin de iyileştiği tespit edilmiştir. Bu çalışma neticesinde elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Alaşıma eklenen Al elementinin $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_x\text{Ni}_{(40-x)}$ YEA'sının kristal yapısını YMK'den HMK'ye doğru değiştirdiği Thermo-Calc yazılımı ile tespit edilmiş ve deneysel olarak üretilen alaşımlarla paralel özellikler elde edilmiştir.
- Yapılan EDS haritalamalarında, alaşımdaki Al ve Ni elementlerinin beraber tane sınırlarına doğru ayrıştığı ve burada AlNi intermetalik fazlarını oluşturduğu tespit edilmiştir. Geri kalan elementler ise matriste homojen bir şekilde dağılmıştır.
- Alaşımdaki Al arttıkça kristal yapının HMK'ye dönüşmesi ve bir miktar intermetalik fazların oluşması neticesinde alaşımın sertliği 146 ± 3 HV'den 563 ± 6 HV'ye kadar artmıştır.
- Alaşımın basma testi altındaki dayanıcı da sertlik testlerine benzer şekilde artış sergilemiş ve başlangıçta $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_5\text{Ni}_{35}$ numunesi için 193 MPa olan akma dayanıcı, $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_{20}\text{Ni}_{20}$ numunesi için 1260 MPa değerine kadar yükselmiştir. $(\text{CoCrFe})_{60}\text{Al}_{30}\text{Ni}_{10}$ numunesinde oluşan yoğun intermetalik fazlar sebebiyle basma testi uygulanmadan, alaşımda kırılma gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Alaşım üretimi konusunda desteklerini sunan Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

Beyramali Kivy, M., Asle Zaeem, M., & Lekakh, S. (2017). Investigating phase formations in cast AlFeCoNiCu high entropy alloys by combination of computational modeling and experiments. *Materials and Design*, 127(February), 224–232. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.086>

- Bönisch, M., Wu, Y., & Sehitoglu, H. (2018). Twinning-induced strain hardening in dual-phase FeCoCrNiAl_{0.5} at room and cryogenic temperature. *Scientific Reports 2018 8:1*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28784-1>
- Cai, Y., Ao, S., Marwana Manladan, S., Xue, J., & Luo, Z. (2019). Evolution mechanisms of TiC ceramic particles in FeCoCrNiAl high-entropy alloy laser cladding layers. *Materials Research Express*, 6(10), 1065d2. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB405D>
- Cai, Y., Zhu, L., Cui, Y., Geng, K., Marwana Manladan, S., & Luo, Z. (2019). High-temperature oxidation behavior of FeCoCrNiAl_x high-entropy alloy coatings. *Materials Research Express*, 6(12), 126552. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/AB562D>
- Diao, H., Ma, D., Feng, R., Liu, T., Pu, C., Zhang, C., Guo, W., Poplawsky, J. D., Gao, Y., & Liaw, P. K. (2019). Novel NiAl-strengthened high entropy alloys with balanced tensile strength and ductility. *Materials Science and Engineering A*, 742, 636–647. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.055>
- Geanta, V., Voiculescu, I., Milosan, I., Istrate, B., & Mates, I. M. (2018). Chemical composition influence on microhardness, microstructure and phase morphology of Al_xCrFeCoNi high entropy alloys. *Revista de Chimie*, 69(4), 798–801.
- George, E. P., Raabe, D., & Ritchie, R. O. (2019). High-entropy alloys. *Nature Reviews Materials 2019 4:8*, 4(8), 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>
- Guo, S., Ng, C., & Liu, C. T. (2013). Anomalous solidification microstructures in Co-free Al_xCrCuFeNi₂ high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 557, 77–81. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.007>
- Guo, S., Ng, C., Lu, J., & Liu, C. T. (2011). Effect of valence electron concentration on stability of fcc or bcc phase in high entropy alloys. *Journal of Applied Physics*, 109(10), 103505. <https://doi.org/10.1063/1.3587228>
- Han, Q. (2008). Shrinkage Porosity and Gas Porosity. İçinde S. Viswanathan, D. Apelian, R. J. Donahue, B. DasGupta, M. Gywn, J. L. Jorstad, R. W. Monroe, M. Sahoo, T. E. Prucha, & D. Twarog (Ed.), *Casting* (C. 15, s. 0). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v15.a0005222>
- Joseph, J., Jarvis, T., Wu, X., Stanford, N., Hodgson, P., & Fabijanic, D. M. (2015). Comparative study of the microstructures and mechanical properties of direct laser fabricated and arc-melted Al_xCoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 633, 184–193.
- Kao, Y.-F., Chen, T.-J., Chen, S.-K., & Yeh, J.-W. (2009). Microstructure and mechanical property of as-cast,-homogenized, and-deformed Al_xCoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 488(1), 57–64.
- Li, C., Li, J. C., Zhao, M., & Jiang, Q. (2009). Effect of alloying elements on microstructure and properties of multiprincipal elements high-entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 475(1–2), 752–757. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.07.124>
- Li, C., Li, J. C., Zhao, M., & Jiang, Q. (2010). Effect of aluminum contents on microstructure and properties of Al_xCoCrFeNi alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 504(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2010.03.111>
- Li, Z., Zhao, S., Ritchie, R. O., & Meyers, M. A. (2019). Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys. *Progress in Materials Science*, 102(March 2018), 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>
- Lim, S. J., & Huh, H. (2022). Ductile fracture behavior of BCC and FCC metals at a wide range of strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 159, 104050. <https://doi.org/10.1016/J.IJIMPENG.2021.104050>
- Liu, J., Wang, X., Singh, A. P., Xu, H., Kong, F., & Yang, F. (2021). The evolution of intermetallic compounds in high-entropy alloys: From the secondary phase to the main phase. *Metals*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/met11122054>
- Manzoni, A., Daoud, H., Völkl, R., Glatzel, U., & Wanderka, N. (2013). Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*, 132, 212–215. <https://doi.org/10.1016/J.ULTRAMIC.2012.12.015>
- Miracle, D. B., Miller, J. D., Senkov, O. N., Woodward, C., Uchic, M. D., & Tiley, J. (2014). Exploration and Development of High Entropy Alloys for Structural Applications. *Entropy 2014, Vol. 16, Pages 494-525*, 16(1), 494–

525. <https://doi.org/10.3390/E16010494>

Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>

Murty, B. S., Yeh, J. W., Ranganathan, S., & Bhattacharjee, P. P. (2019). High-entropy alloys: basic concepts. İçinde *High-Entropy Alloys* (ss. 13–30). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816067-1.00002-3>

Polat, G., Erdal, Z. A., & Kalay, Y. E. (2020). Design of Novel Non-equiatom Cu-Ni-Al-Ti Composite Medium-Entropy Alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(5), 2898–2908. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04830-w>

Polat, G., Tekin, M., & Kotan, H. (2022). Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 146(May), 107589. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107589>

Shiratori, H., Fujieda, T., Yamanaka, K., Koizumi, Y., Kuwabara, K., Kato, T., & Chiba, A. (2016). Relationship between the microstructure and mechanical properties of an equiatom AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated by selective electron beam melting. *Materials Science and Engineering A*, 656, 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.019>

Sistla, H. R., Newkirk, J. W., & Frank Liou, F. (2015). Effect of Al/Ni ratio, heat treatment on phase transformations and microstructure of Al_xFeCoCrNi_{2-x} (x=0.3, 1) high entropy alloys. *Materials and Design*, 81, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.027>

Sohn, S. S., Kwiatkowski da Silva, A., Ikeda, Y., Körmann, F., Lu, W., Choi, W. S., Gault, B., Ponge, D., Neugebauer, J., & Raabe, D. (2019). Ultrastrong Medium-Entropy Single-Phase Alloys Designed via Severe Lattice Distortion. *Advanced Materials*, 31(8), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adma.201807142>

Takeuchi, A., & Inoue, A. (2005). Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element. *Materials Transactions*, 46(12), 2817–2829. <https://doi.org/10.2320/matertrans.46.2817>

Tokarewicz, M., & Grądzka-Dahlke, M. (2021). Review of Recent Research on AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy. *Metals 2021, Vol. 11, Page 1302*, 11(8), 1302. <https://doi.org/10.3390/MET11081302>

Tong, C. J., Chen, Y. L., Chen, S. K., Yeh, J. W., Shun, T. T., Tsau, C. H., Lin, S. J., & Chang, S. Y. (2005). Microstructure characterization of Al_xCoCrCuFeNi high-entropy alloy system with multiprincipal elements. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 36(4), 881–893. <https://doi.org/10.1007/S11661-005-0283-0/METRICS>

Tripathy, S., Gupta, G., & Chowdhury, S. G. (2018). High Entropy Alloys: Criteria for Stable Structure. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 49(1), 7–17. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4388-z>

Wang, F. J., Zhang, Y., & Chen, G. L. (2009). Atomic packing efficiency and phase transition in a high entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 478(1–2), 321–324.

Wang, W. R., Wang, W. L., Wang, S. C., Tsai, Y. C., Lai, C. H., & Yeh, J. W. (2012a). Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of Al xCoCrFeNi high-entropy alloys. *Intermetallics*, 26, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2012.03.005>

Wang, X. J., Xu, M., Liu, N., & Liu, L. X. (2021). The formation of sigma phase in the CoCrFeNi high-entropy alloys. *Materials Research Express*, 8(7). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac0a5c>

Wang, Y. P., Li, B. S., Ren, M. X., Yang, C., & Fu, H. Z. (2008). Microstructure and compressive properties of AlCrFeCoNi high entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 491(1–2), 154–158.

Yang, T., Xia, S., Liu, S., Wang, C., Liu, S., Zhang, Y., Xue, J., Yan, S., & Wang, Y. (2015). Effects of Al addition on microstructure and mechanical properties of Al_xCoCrFeNi High-entropy alloy. *Materials Science and Engineering A*, 648, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.034>

Yang, X., & Zhang, Y. (2012). Prediction of high-entropy stabilized solid-solution in multi-component alloys. *Materials Chemistry and Physics*, 132(2–3), 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.11.021>

Yeh, J. W. (2006). Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*, 31(6), 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>

Yeh, J. W., Chen, S. K., Lin, S. J., Gan, J. Y., Chin, T. S., Shun, T. T., Tsau, C. H., & Chang, S. Y. (2004). Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*, 6(5), 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>

Zhang, L., Zhou, Y., Jin, X., Du, X., & Li, B. (2018). Precipitation-hardened high entropy alloys with excellent tensile properties. *Materials Science and Engineering A*, 732, 186–191. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.06.102>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.04.2023
Kabul Tarihi : 19.06.2023

Received Date : 30.04.2023
Accepted Date : 19.06.2023

FABRICATION OF COPPER OXIDE NANOPARTICLES DOPED PCL/PVP NANOFIBROUS MATS BY ELECTROSPINNING AND EVALUATION OF THEIR ANTIBACTERIAL ACTIVITIES

BAKIR OKSİT NANOPARTİKÜL KATKILI PCL/PVP NANOLİFLİ MATLARIN ELEKTROÇEKİM İLE ÜRETİMİ VE ANTİBAKTERİYEL AKTİVİTELERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Fatih ERCİ¹ (ORCID: 0000-0002-3044-7343)
Fatma BAYRAM SARIİPEK^{2*} (ORCID: 0000-0001-8168-3517)

¹Necmettin Erbakan University, Department of Biotechnology, Konya, Türkiye
²Konya Technical University, Department of Chemical Engineering, Konya Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatma BAYRAM SARIİPEK; fsariipek@ktun.edu.tr

ABSTRACT

In this study, PCL/PVP/CuO nanofibrous mats for antibacterial applications were fabricated by electrospinning technique using PCL/PVP as a biopolymer matrix and copper oxide nanoparticles (CuONPs) as antimicrobial agents. PCL/PVP/CuO nanofibrous mats were successfully produced by doping different ratios of CuONPs (0.5%, 1%, and 2% wt) into the PCL/PVP solution. The chemical, morphological, and wetting properties of the prepared composite nanofibrous mats were evaluated by FT-IR, FE-SEM analysis, and water contact angle measurements. The morphological investigation indicated that the fiber diameters of the resulting nanofibers decreased as the CuONP content added to the PCL/PVP matrix increased, and the mean fiber diameter value measured for the PCL/PVP/2%CuONPs nanofibrous sample was 186.73. Moreover, wetting behavior of nanofiber surfaces displayed that the incorporation of PVP significantly enhanced the surface wettability of PCL with hydrophobic properties, but the addition of CuONPs to the obtained PCL/PVP matrix decreased it. An in vitro bactericidal assay was performed to investigate the efficacy of PCL/PVP/CuO nanofibrous samples against *Staphylococcus aureus*. The addition of CuONPs to the fibers led to antibacterial activity, which was found to increase with higher doping ratios. The results showed the potential of PCL/PVP/CuO nanofibrous mats to serve as an effective biomaterial for antibacterial applications.

Keywords: Antibacterial nanofibrous mats, copper oxide nanoparticle, electrospinning technique, polycaprolactone, polyvinylpyrrolidone

ÖZET

Bu çalışmada, biyopolimer matris olarak PCL/PVP ve antimikrobiyal ajan olarak bakır oksit nanopartikülleri (CuONPs) kullanılarak elektroçekim tekniği ile antibakteriyel uygulamalar için PCL/PVP/CuO nanolifli matlar üretildi. PCL/PVP/CuO nanolifli matlar, PCL/PVP çözeltisine farklı oranlarda CuONPs'in (ağırlıkça %0,5, %1 ve %2) katılmasıyla başarılı bir şekilde üretildi. Hazırlanan kompozit nanolifli matların kimyasal, morfolojik ve ıslanma özellikleri FT-IR, FE-SEM analizleri ve temas açısı ölçümü ile değerlendirildi. Morfolojik inceleme, PCL/PVP matrisine eklenen CuONPs içeriği arttıkça sonuçlanan nanoliflerin lif çaplarının azaldığını ve PCL/PVP/2%CuONPs nanolifli örneği için ölçülen ortalama lif çapı değerinin 186.73° olduğunu gösterdi. Dahası, nanolif yüzeylerinin ıslanma davranışı, PVP'nin dahil edilmesinin, hidrofobik özelliklere sahip PCL'in yüzey ıslanabilirliğini önemli ölçüde artırırken ancak elde edilen PCL/PVP matrise CuONPs ilavesinin ise azalttığını

ToCite: ERCİ, F., & BAYRAM SARIİPEK, F., (2023). FABRICATION OF COPPER OXIDE NANOPARTICLES DOPED PCL/PVP NANOFIBROUS MATS BY ELECTROSPINNING AND EVALUATION OF THEIR ANTIBACTERIAL ACTIVITIES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 823-833.

gösterdi. PCL/PVP/CuO nanolifli örneklerinin *Staphylococcus aureus*'a karşı etkinliğini araştırmak için bir in vitro antibakteriyel aktivite testi gerçekleştirildi. CuONPs'in liflere eklenmesi antibakteriyel aktiviteye yol açtı ve bu aktivitenin daha yüksek nanopartikül katkı oranlarıyla arttığı bulundu. Sonuçlar, PCL/PVP/CuO nanolifli matların antibakteriyel uygulamalar için etkili bir biyomalzeme olarak işlev görebilme potansiyelini gösterdi.

Anahtar Kelimeler: Antibakteriyel nanolifli matlar, bakır oksit nanopartikül, elektroçekim tekniği, polikaprolakton, polivinilpirolidon

INTRODUCTION

The interdisciplinary field of nanotechnology is rapidly expanding and holds enormous potential to transform a variety of industries, such as agriculture, electronics, medicine, and textiles. Particles that fit within the range of 1 to 100 nanometers in at least one dimension are known as nanoparticles. These materials have piqued the interest of researchers due to their notable chemical and physical properties that differentiate them from their bulk forms. These attributes include but are not limited to, strength and stiffness, electrical conductivity, chemical reactivity, and diverse biological activities (Khan, Saeed, & Khan, 2019; Sahooli, Sabbaghi, & Saboori, 2012). Inorganic nanoparticles, particularly metal-based ones, have gained popularity as a potential solution for bacteria resistant to traditional antibiotics. These nanoparticles have unique mechanisms of action that differ from traditional antibiotics, making them effective against resistant strains and even preventing the development of resistance. In addition, they can target multiple biomolecules involved in the development of resistant strains (Slavin, Asnis, Häfeli, & Bach, 2017). Compared to organic antimicrobial agents, CuO nanoparticles are a more robust and stable material with a longer shelf life. As efficient materials for the treatment of water, textiles, and other items, copper and its complexes are being employed more frequently. Microorganisms are extremely sensitive to copper and its complexes even at low concentrations, whereas human tissues barely react to them. Due to their tendency for rapid oxidation in the presence of air, metallic copper nanoparticles, particularly those formed when Cu^{2+} , can become unstable chemically and physically (Das, Nath, Phukon, & Dolui, 2013; Raffi et al., 2010).

Electrospinning technology can produce nanofibers with controllable size and structure, high porosity, and a large specific surface area. Electrospinning nanofibers exhibit a significant increase in specific surface area, at least 100 times more than conventional microfibers, due to their significantly smaller fiber diameter than microfibers made using traditional spinning techniques including melt spinning, wet spinning, dry spinning, and dry-wet spinning (Qi et al., 2021). These properties make them highly desirable for use in a variety of research and development fields, particularly in biological materials (Li et al., 2018, 2019a). The electrospinning technique has attracted a lot of attention in recent years for producing biodegradable polymer fibers due to its ease, cost-effectiveness, and reproducibility. Biodegradable polymers such as polyglycolic acid, polylactic acid, polylactic-co-glycolic acid, fibrin, gelatin, PHB, and poly (ϵ -caprolactone) (PCL) are commonly used in this process (Ajallouei et al., 2014; Maleki, Azimi, Ismaeilimoghadam, & Danti, 2022; Mayilswamy, Jaya Prakash, & Kandasubramanian, 2023; Saripek, Özyaytekin, & Erci, 2023).

Polycaprolactone (PCL) is a synthetic polymer that is semi-crystalline in nature. With a glass transition temperature of -62°C , PCL has a relatively low melting point, typically ranging from $55-60^\circ\text{C}$, depending on the degree of crystallinity (Fadaie, Mirzaei, Geramizadeh, & Asvar, 2018). PCL has been approved for use in the biomedical field due to its biocompatibility and low cost. PCL is a highly compatible and soluble material that can be easily processed at room temperature. In addition, PCL nanocomposites provide an ideal matrix to promote cell growth and ensure sustained release of antimicrobial agents (Díez-Pascual & Luceño-Sánchez, 2021). Its approval by the FDA makes it an attractive option for use in drug delivery systems, especially as electrospinning nanofibers (Saracino et al., 2021). While PCL has the potential for use in the medical field, its hydrophobic nature and slow degradation rate are limiting factors. To overcome this, blending hydrophilic polymers with PCL could improve water diffusion near PCL chains, leading to faster hydrolytic cleavage and potentially overcoming these biological disadvantages (Y. Wang et al., 2022). The characteristic properties of PCL, coupled with its disadvantages, have opened avenues for the development of novel functional composite materials. PCL's performance can be enhanced by combining it with various substances for a range of biomedical applications (Raina, Pahwa, Khosla, Gupta, & Gupta, 2022).

Polyvinylpyrrolidone (PVP) is a favorable option when it comes to blending with PCL because of its biocompatibility, ability to dissolve efficiently in various solvents, and potential to interact with materials that are both hydrophobic and hydrophilic (Chaudhuri, Mondal, Ray, & Sarkar, 2016). There is preliminary evidence that

adding PVP can make PCL nanofiber membranes more hydrophilic (Li et al., 2019b). Without incorporating antibacterial properties, PCL and PVP utilization may result in severe infections that necessitate further medical interventions. Thus, to prevent this outcome, it is critical to introduce strong antibacterial agents, for instance, metal and metal oxide nanoparticles, into PCL/PVP nanofibers, thereby conferring them with exceptional antibacterial characteristics (Liu et al., 2022).

The primary aim of this research was to fabricate nanofibrous mats composed of a blend of polycaprolactone (PCL) and polyvinylpyrrolidone (PVP) doped with varying concentrations of copper oxide nanoparticles using the electrospinning technique. The nanofibrous samples were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). Also, the wetting behavior of electrospinning nanofibrous mats was analyzed via water contact angle tests. Furthermore, the prepared nanofibers were tested for their antimicrobial activity against *S. aureus* to evaluate their potential use in medical applications.

MATERIAL AND METHODS

Materials

Poly (ϵ -caprolactone) (PCL, molecular weight $45,000 \text{ g mol}^{-1}$) granules and polyvinylpyrrolidone (PVP, molecular weight $40,000 \text{ g mol}^{-1}$) in powder form were procured from Sigma-Aldrich (USA) to serve as a biopolymer matrix. The solvents used were dichloromethane (DCM, 99,8%, Merck) and ethanol (Eth, %99.8, Merck). Copper oxide nanopowder with 30 nm average particle size to be used as additive material was obtained from Nanografi Nano Teknoloji, Türkiye. The chemicals utilized in the work were of analytical grade and were employed without any additional purification.

Preparation of Electrospun PCL/PVP/CuONPs Nanofibrous Mats

Pure PCL and PCL/PVP solutions were prepared in DCM-Eth (V/V, 3:1) binary solvent by adjusting the weight of each component. To produce PCL nanofibers, pure PCL granules were dissolved in CF-DMF and the resulting spinning solution, containing 17% (w/v) PCL, was continuously stirred for 4 h at room temperature. For PCL/PVP nanofibers, PCL and PVP (w/w, 7:3) granules were dissolved sequentially in DCM-Eth solvent. First, PVP granules were mechanically stirred for 4 h, and then PVP granules were added and stirred continuously overnight for complete dissolution. To produce PCL/PVP/CuONPs nanocomposite fibers, CuONP content was added to the PCL/PVP spinning solution as 0.5, 1.0, 2.0 wt% of the total polymer mass and mechanically stirred for 60 min to achieve homogenization. All working solutions were let to stabilize for 1 h at ambient temperature before electrospinning. The spinning solutions were placed into a plastic syringe and subsequently, electrospinning was carried out at a flow rate of 0.5 mL/h, a high voltage of 12 kV, a distance between the needle tip and the collector of 12 cm, 35 °C and 40% relative humidity. Then, the resulting nanofibrous mats were kept in an oven at 37 °C for one day to remove solvent residues. The production processes of PCL/PVP/CuONPs nanofibrous composite mats are given in Figure 1.

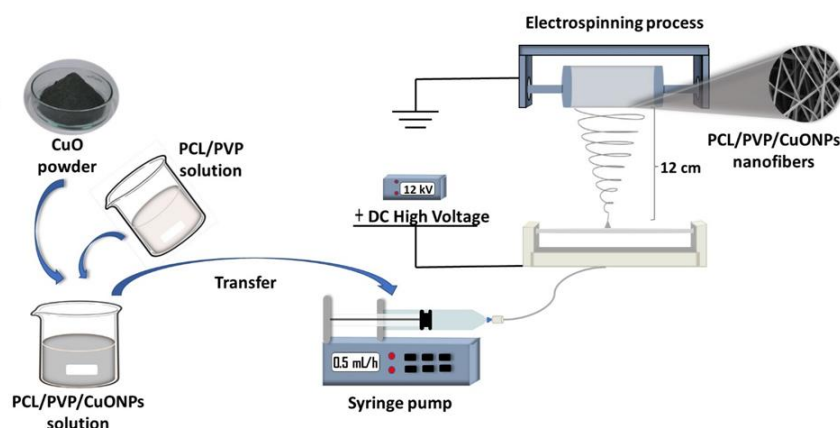


Figure 1. Schematic Representation of Production Processes of PCL/PVP/CuONPs Nanofibrous Composite Mats

Characterization of Fabricated Nanofibrous Mats

The chemical structures of the produced nanofibrous mats were evaluated employing Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) Bruker Vertex 70, attenuated total reflection mode in the range $400\text{-}4000 \text{ cm}^{-1}$ with a resolution

of 4 cm^{-1} . The morphology of the prepared nanofiber mat surfaces was observed by using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM, Zeiss GeminiSEM 500) in BITAM laboratory, Turkey. ImageJ software was utilized to determine the average diameter (AD) of the fibers ($n = \sim 100$) and given as standard deviation \pm mean diameter. Wetting properties of the nanofiber mat surfaces were detected at room temperature using a digital water contact angle meter (Biolin Scientific Attension, Theta Lite). Each nanofiber sample was cut to $20 \times 20 \text{ mm}$ and placed on the setup. $5 \mu\text{L}$ volume of water droplets at room temperature was dripped onto all surfaces to measure the contact angle. Six measurements were averaged for each sample.

Antibacterial Test

The plate count assay was used to evaluate the antibacterial efficacy of the nanofibrous mats. The bacterial suspensions of *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) were prepared at a concentration of $1.5 \times 10^8 \text{ CFU/mL}$ in 10 mL of liquid Nutrient Broth (NB) medium and then added to the surface of a circular sheet mat (20 mg; 20.00 mm in diameter) and incubated at 37°C for 24 h. Following the incubation period, the nanofibrous samples underwent a washing process using 1 mL of NB medium. Then, 100 μL of the washed solution was collected and placed onto Nutrient agar plates to facilitate inoculation. Subsequently, the plates were incubated at 37°C for 24 h, and then the colonies present in the plates were counted for analysis.

RESULT AND DISCUSSION

The chemical structures of all prepared nanofibrous mats were revealed by FT-IR spectroscopy. The FT-IR spectra of the nanofibrous PCL, PCL/PVP, and PCL/PVP/CuO mats are displayed in Figure 2. The FT-IR spectra of PCL mats exhibited characteristic bands at 1724 cm^{-1} (C=O stretching vibrations); 1471 cm^{-1} , 1453 cm^{-1} and 1367 cm^{-1} (-CH₂ bending vibrations); 1240 cm^{-1} and 1177 cm^{-1} (C-O-C stretching vibrations); and 1106 cm^{-1} and 1048 cm^{-1} (C-O stretching vibrations) (Chakrapani, Gnanamani, Giridev, Madhusoothanan, & Sekaran, 2012). FT-IR spectra of PCL/PVP nanofibers showed bands at 1724 cm^{-1} (C=O of PCL), 1667 cm^{-1} (C=O of PVP), 2944 cm^{-1} (C-H asymmetric stretching), 2867 cm^{-1} (C-H symmetric stretching), 1421 cm^{-1} (C-N vibration), 1460 cm^{-1} (C-H deformation), 1366 cm^{-1} (CO symmetric stretching) and 1240 cm^{-1} (C-O-C) asymmetric stretching). This demonstrates the inclusion of these two polymers in the PCL/PVP nanofiber composite composition (Jia, Huang, Dong, Liu, & Nie, 2016). The spectrum of PCL/PVP/CuONPs nanocomposites displayed nearly no change in the peak positions of the absorption peaks indicating the molecular dispersion of CuONPs in PCL/PVP nanofibers. The unchanged characteristic absorption bands indicate that PCL/PVP nanofibers retain the chemical feature of PCL/PVP nanofibers and the antimicrobial feature of CuONPs. Furthermore, their combination confirms the absence of any chemical interactions during the electrospinning process of PCL/PVP/CuONPs nanofibers and the successful physical doping of CuONPs into PCL/PVP nanofibers by Vander Waals forces. Moreover, a rise in the intensity of these characteristic peaks was observed with increasing CuONPs addition in nanofibers with different CuONPs content. This can be attributed to the constitution of new atoms or bonds within the environment in the presence of CuONPs.

FE-SEM images of the produced PCL, PCL/PVP, and PCL/PVP/CuO nanofiber samples are shown in Figure 3. For the determination of the average diameter of the obtained fibers, the diameter of fibers was measured at 100 various points on the FE-SEM image. It was observed that the prepared nanofibers generally exhibited beadles and continuous uniformly distributed nanostructures of varying diameters. The average fiber diameters of PCL and PCL/PVP nanofibers were 81.80 and 261.98 nm, respectively (Table 1). The distinction can be attributed to the PCL solution's stronger conductivity and lower viscosity when compared to PVP, which raises the fibers' elongation stress. One of the most crucial electrospinning variables impacting fiber diameter is solution viscosity. When compared to a solution with a lower viscosity, a higher viscosity solution produces fibers with a larger diameter. Since the addition of PVP to PCL led to a more viscous solution, it resulted in nanofibers with higher average fiber diameter than PCL nanofibers. Moreover, the fiber diameter distribution plot shows that PCL nanofibers have a diameter distribution ranging from 40-300 nm but mostly fibers between 50-100 nm were obtained. It was determined that approximately 48% of PCL/PVP fiber diameters were in the range of 200-300 nm. With the addition of 0.5% CuONP to PCL/PVP nanofibers, the average fiber diameter declined to 210.30 and it was observed that approximately 41% of PCL/PVP/CuONPs nanofibers comprised of fibers with a diameter of 100-200 nm and 42% of fibers with a diameter of 200-300 nm. The enhanced solution conductivity, which has an impact on the Taylor cone size, can be used to explain the decrease in the diameter size of PCL/PVP nanofibers. It was found that the diameter distribution of PCL/PVP fibers was wide and that this structure was not particularly homogeneous in the diameter distribution

histogram plots of the nanofibers in Figure 4. In the case of PCL/PVP/CuONPs fibers, together with a decrease in diameter, and a rise in the homogeneity of the fiber structures was also seen.

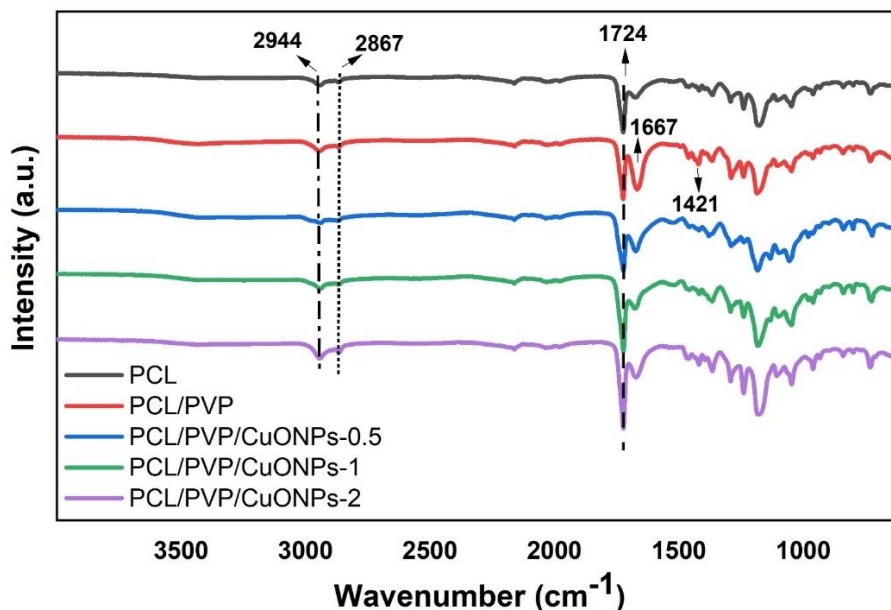


Figure 2. The FT-IR Spectra of PCL, PVP and PCL/PVP/CuO (with 0.5%, 1% and 2% CuO content) Nanofibrous Mats

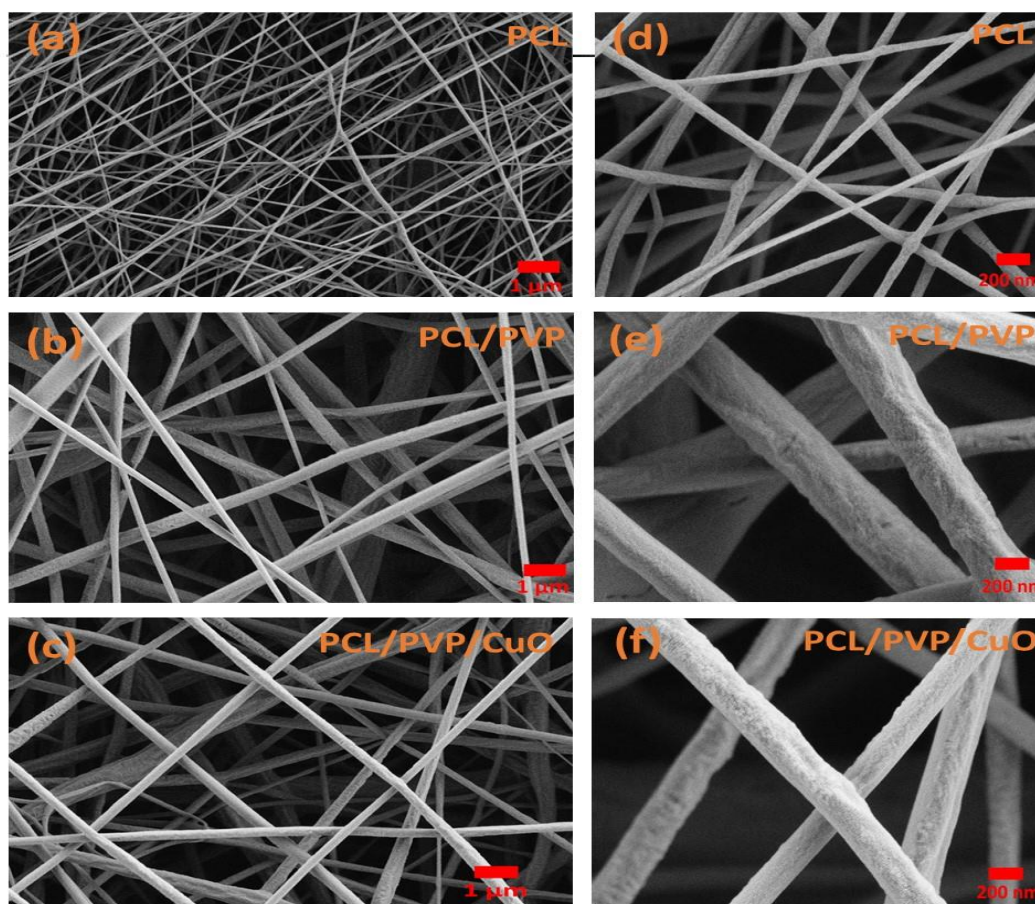


Figure 3. FE-SEM images of (a) PCL, (b) PCL/PVP, and (c) PCL/PVP/2%CuONPs, and high magnification images of (d) PCL, (e) PCL/PVP, and (f) PCL/PVP/0.5%CuONPs

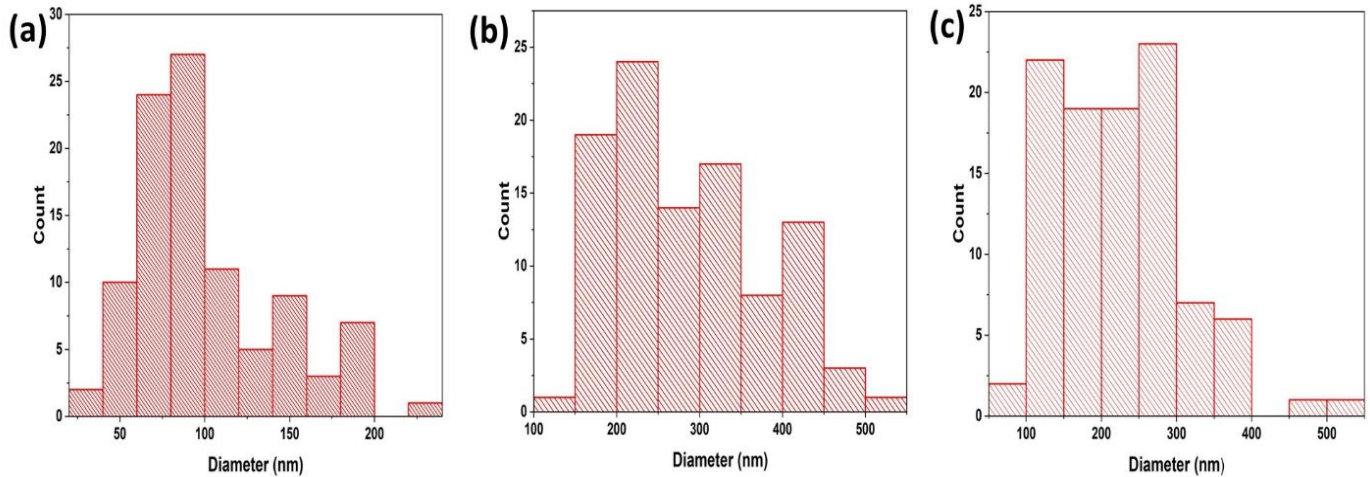


Figure 4. Fiber size distribution histograms of (a) PCL, (b) PCL/PVP and (c) PCL/PVP/0.5% CuONPs nanofibrous mats

Table 1. Average Fiber Diameters and Water Contact Angle Measurements of PCL, PCL/PVP and PCL/PVP/CuONPs Nanofibrous Mats

Sample	Mass ratios of PCL/PVP (wt%)	Content of CuONPs (wt%)	WCA values (°)	Average fiber diameters (nm)
PCL	1/0	0	117.46	81.80
PCL/PVP	7/3	0	61.53	261.98
PCL/PVP/CuO-0.5	7/3	0.5	75.56	210.30
PCL/PVP/CuO-1	7/3	1	90.46	198.04
PCL/PVP/CuO-2	7/3	2	102.92	186.73

Figure 5 displays the elemental mapping for all the nanofibers produced. The EDS spectra of PCL, PCL/PVP, PCL/PVP/2%CuONPs nanofibers revealed the presence of C, O, N and Cu elements, along with their corresponding peak intensities and mass percentages. Electron mapping imaging was employed to verify the uniform dispersion of CuONPs in the fibers during the production of CuONPs-doped PCL/PVP nanofibers. The mapping outcomes for the FE-SEM image of PCL nanofibers in Figure 6a are presented in Figure 6b, which clearly indicates the successful production of PCL nanofibers and the presence of C and O in the medium. Figure 6d displays the mapping results for the FE-SEM image in Figure 6c. The successful production of PCL/PVP nanofibers was verified by the presence of C, O, and N elements in the medium, as indicated by the research results. The mapping outcomes obtained on the FE-SEM image in Figure 5e are finally displayed in Figure 5f. The findings demonstrated that Cu was present in the PCL/PVP fibers. Additionally, it was found that the PCL/PVP/CuO medium had more oxygen than PCL/PVP did. The presence of Cu in the medium and the increase in the amount of O is evidence of the successful doping of CuO NPs into PCL/PVP nanofibers. In addition, it was determined that all elements were predominantly homogeneously distributed, but Cu was also observed to accumulate in very small spots.

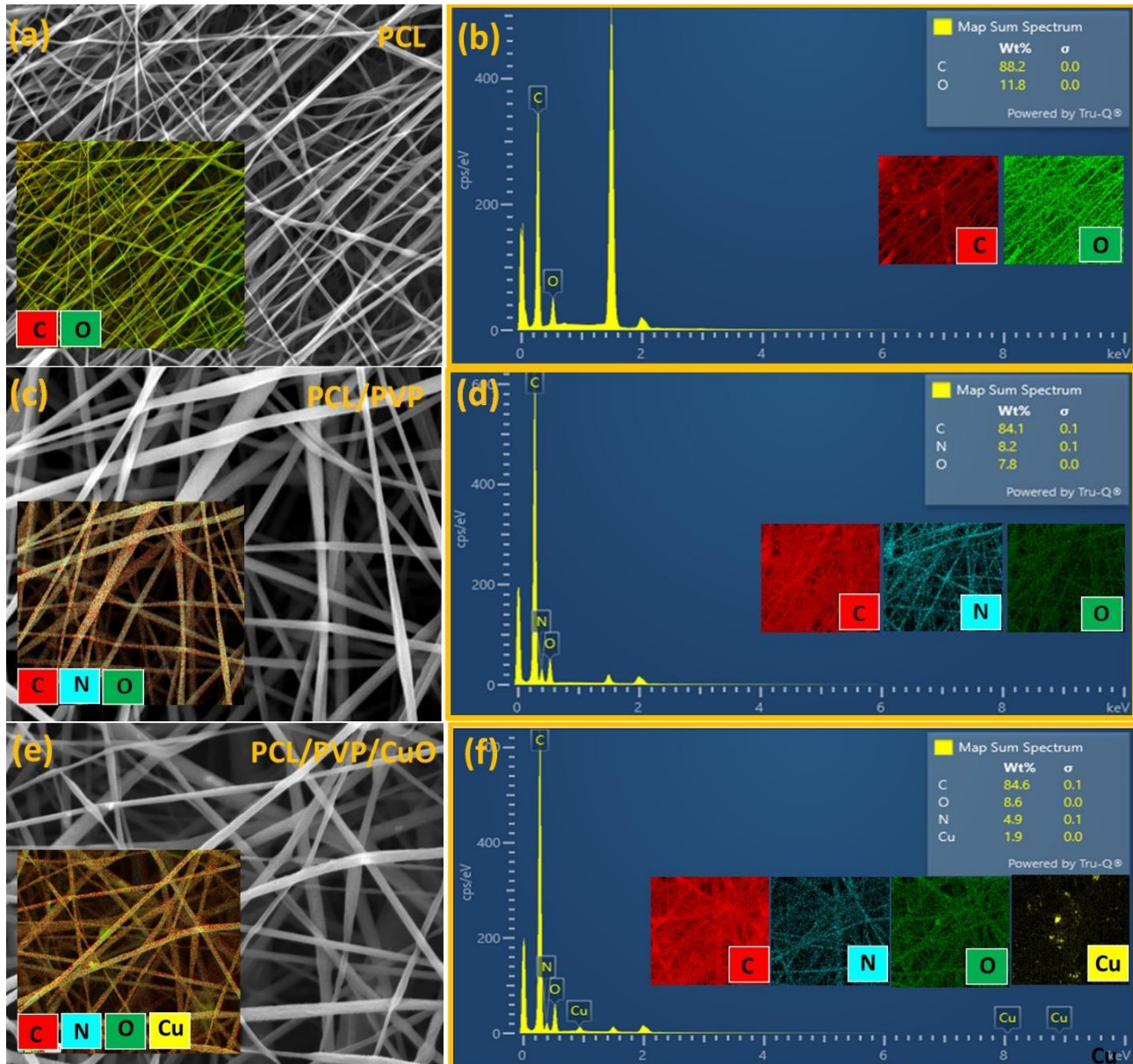


Figure 5. FE-SEM EDS Analysis of (a) PCL, (c) PCL/PVP, and (e) PCL/PVP/2.0%CuONPs, and FE-SEM EDS Mapping Images of (b) PCL, (d) PCL/PVP, and (f) PCL/PVP/2.0%CuONPs

Water contact angle (WCA) tests were conducted, as depicted in Figure 6, to examine the wetting characteristics of nanofibrous mats. The measured WCA values of each nanofibrous surface are given in Table 1. The contact angles of water droplets on the surfaces of the PCL, PCL/PVP, and PCL/PVP/CuONPs nanofiber were measured to determine their wettability. The PCL nanofibrous mat surface's WCA value, which has a hydrophobic nature due to the crystal regions in its structure, was measured as 117.46° . The WCA value of PCL/PVP composite nanofibers obtained by blending PCL with PVP was measured as 61.53° , which was significantly lower than that of PCL. The hydrophilic nature of PVP is mainly due to its hydrophilic amino and carboxyl groups and hence, when blended with PCL, it leads to the improvement of the wettability behavior of PCL fibers. Different contents of CuONPs were dropped to the PCL/PVP matrix and as displayed in Figure 6, the WCA value of PCL/PVP fibers increased with increasing CuO/NPs (0.5, 1 and 2wt%). The addition of CuONPs to PCL/PVP nanofibrous mats resulted in a decrease in their hydrophilic nature, as evidenced by the increase in contact angles which was measured for

PCL/PVP/0.5%CuONPs, PCL/PVP/1%CuONPs, and PCL/PVP/2%CuONPs nanofibrous mats as 75.56°, 90.46°, and 102.92°, respectively (Mallakpour & Mansourzadeh, 2017; L. Wang et al., 2023)

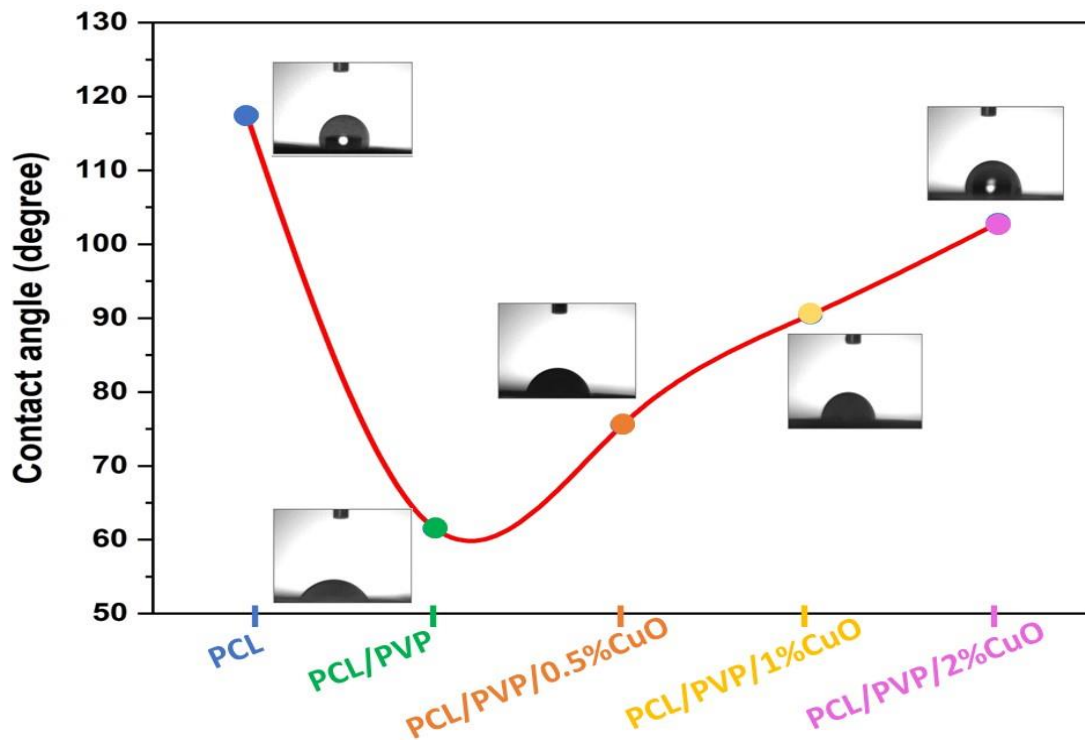


Figure 6. Water Contact Angle Measurements of PCL, PCL/PVP, and PCL/PVP/CuONPs Nanofibrous Mats

Staphylococcus aureus was selected to assess the antibacterial activity of the nanofibrous samples. As shown in Figure 7, the nanofibers containing CuONPs showed antibacterial activities. In comparison with PVP/PCL, CuONPs/PVP/PCL nanofibers enhanced the antibacterial efficacy due to the incorporation of CuONPs. The efficiency also increased with the amount of CuONPs loaded into the nanofibrous mats.

The loading of some metal nanoparticles and substances derived from plants on PCL/PVP nanofibrous mats and their antibacterial properties have been the subject of numerous studies in the literature. Hu et al. (2018) employed electrospinning technology to create nanofibers made of polyvinylpyrrolidone (PVP) and polycaprolactone (PCL) that were loaded with zinc oxide/silver bimetallic nanoparticles. They tested the antibacterial activity of these nanofibers against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. The research discovered that adding metal nanoparticles to PVP/PCL nanofibers produced fibers with improved antibacterial activity and good biocompatibility (Hu et al., 2018). In another research, Suganya et al. (2011) suggested using nanofibers constructed of PCL/PVP that included crude bark extracts of the medicinal plant *Tecomella undulata* to treat skin infections. In their study, they evaluated the antibacterial activity of the nanofibrous samples against *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, and *Escherichia coli* and obtained inhibition zones of 30, 24, and 28 mm in diameter, respectively. They concluded that the loaded PCL/PVP nanofibrous mats have strong antibacterial activity against these bacteria and can be used in the treatment of skin infections (Suganya, Senthil Ram, Lakshmi, & Giridev, 2011). Additionally, recent studies have shown that CuONPs have strong antibacterial and antibiofilm properties. In a recent study, Erci et al. (2020) synthesized and evaluated the antibacterial and antibiofilm characteristics of CuONPs on *Staphylococcus aureus*. The results established that CuONPs demonstrated significant potential in preventing the growth of *Staphylococcus aureus* (Erci, Cakir-Koc, Yontem, & Torlak, 2020).

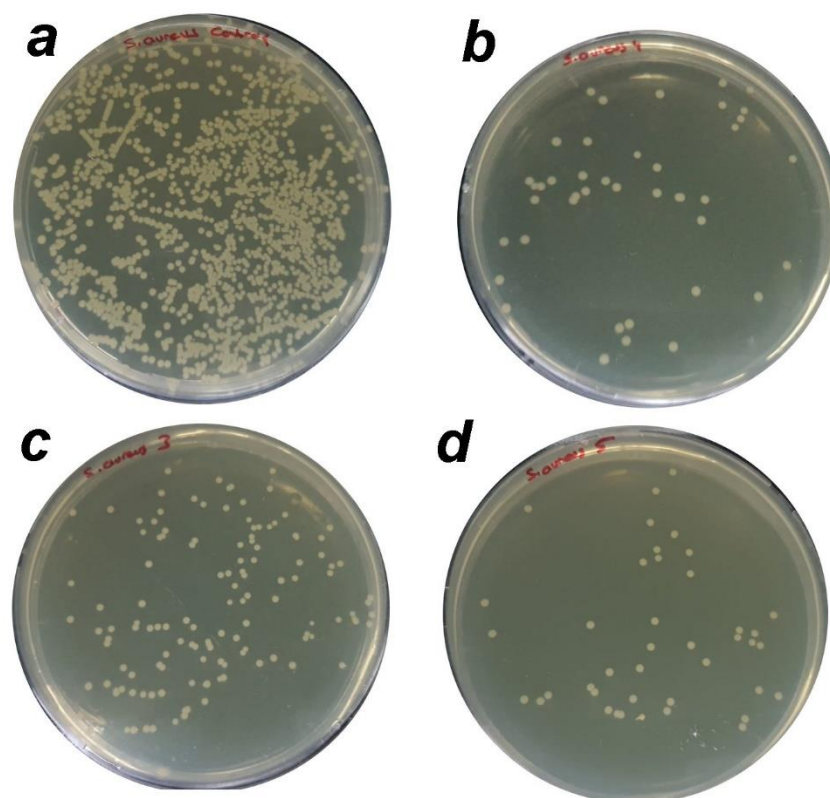


Figure 7. Antibacterial Activity Nanofibrous Mats Against *S. aureus*. (a) PCL/PVP, (b) PCL/PVP/0.5%CuO, (c) PCL/PVP/1.0%CuO, and (d) PCL/PVP/2.0%CuO

CONCLUSION

CuONPs were incorporated into PCL/PVP nanofibrous mats using electrospinning technology, and their antibacterial properties were evaluated. This is the first study to demonstrate the loading of CuONPs into PCL/PVP nanofibrous mats and to evaluate their antibacterial potentials. The morphologies of the prepared nanofibrous mats were observed to be uniform and continuous. The interactions between PCL and PVP were weak, according to FT-IR spectra. The resulting nanofibers were found to have both hydrophobic and hydrophilic properties and were confirmed to contain CuONPs through FE-SEM, EDX, and FT-IR analyses. The nanofibers also demonstrated good bacteriostatic properties against *S. aureus*. The results suggest that increasing the addition of CuONPs decreased the fiber diameters of nanofiber samples while increasing their antibacterial properties. In conclusion, this work has demonstrated the potential of PCL/PVP/CuONPs nanofibrous mats for use in a variety of antibacterial applications, including materials for wound healing.

REFERENCES

- Ajallouei, F., Tavanai, H., Hilborn, J., Donzel-Gargand, O., Leifer, K., Wickham, A., & Arpanaei, A. (2014). Emulsion Electrospinning as an Approach to Fabricate PLGA/Chitosan Nanofibers for Biomedical Applications. *BioMed Research International*, 2014, 475280. <https://doi.org/10.1155/2014/475280>
- Chakrapani, V. Y., Gnanamani, A., Giridev, V. R., Madhusoothanan, M., & Sekaran, G. (2012). Electrospinning of type I collagen and PCL nanofibers using acetic acid. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(4), 3221–3227. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.36504>
- Chaudhuri, B., Mondal, B., Ray, S. K., & Sarkar, S. C. (2016). A novel biocompatible conducting polyvinyl alcohol (PVA)-polyvinylpyrrolidone (PVP)-hydroxyapatite (HAP) composite scaffolds for probable biological application. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 143, 71–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2016.03.027>

- Das, D., Nath, B. C., Phukon, P., & Dolui, S. K. (2013). Synthesis and evaluation of antioxidant and antibacterial behavior of CuO nanoparticles. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 101, 430–433. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.07.002>
- Díez-Pascual, A. M., & Luceño-Sánchez, J. A. (2021). Antibacterial Activity of Polymer Nanocomposites Incorporating Graphene and Its Derivatives: A State of Art. *Polymers*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/polym13132105>
- Erci, F., Cakir-Koc, R., Yontem, M., & Torlak, E. (2020). Synthesis of biologically active copper oxide nanoparticles as promising novel antibacterial-antibiofilm agents. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 50(6), 538–548. <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1711393>
- Fadaie, M., Mirzaei, E., Geramizadeh, B., & Asvar, Z. (2018). Incorporation of nanofibrillated chitosan into electrospun PCL nanofibers makes scaffolds with enhanced mechanical and biological properties. *Carbohydrate Polymers*, 199, 628–640.
- Hu, M., Li, C., Li, X., Zhou, M., Sun, J., Sheng, F., ... Lu, L. (2018). Zinc oxide/silver bimetallic nanoencapsulated in PVP/PCL nanofibres for improved antibacterial activity. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 46(6), 1248–1257. <https://doi.org/10.1080/21691401.2017.1366339>
- Jia, Y., Huang, G., Dong, F., Liu, Q., & Nie, W. (2016). Preparation and characterization of electrospun poly(ϵ -caprolactone)/poly(vinyl pyrrolidone) nanofiber composites containing silver particles. *Polymer Composites*, 37(9), 2847–2854. <https://doi.org/10.1002/pc.23481>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931. <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2017.05.011>
- Li, R., Cheng, Z., Wen, R., Zhao, X., Yu, X., Sun, L., ... Kang, L. (2018). Novel SA@Ca²⁺/RCSPs core-shell structure nanofibers by electrospinning for wound dressings. *RSC Advances*, 8(28), 15558–15566. <https://doi.org/10.1039/C8RA00784E>
- Li, R., Cheng, Z., Yu, X., Wang, S., Han, Z., & Kang, L. (2019a). Preparation of antibacterial PCL/PVP-AgNP Janus nanofibers by uniaxial electrospinning. *Materials Letters*, 254, 206–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.075>
- Li, R., Cheng, Z., Yu, X., Wang, S., Han, Z., & Kang, L. (2019b). Preparation of antibacterial PCL/PVP-AgNP Janus nanofibers by uniaxial electrospinning. *Materials Letters*, 254, 206–209. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.075>
- Liu, Y., Liu, Y., Li, X., Qian, Y., Lv, L., & Wang, Y. (2022). Fabrication and research of Mg(OH)₂/PCL/PVP nanofiber membranes loaded by antibacterial and biosafe Mg(OH)₂ nanoparticles. *Polymer Testing*, 112, 107635. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107635>
- Maleki, H., Azimi, B., Ismaeilmoghadam, S., & Danti, S. (2022). Poly(lactic acid)-Based Electrospun Fibrous Structures for Biomedical Applications. *Applied Sciences*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/app12063192>
- Mallakpour, S., & Mansourzadeh, S. (2017). Application of CuO nanoparticles modified with vitamin B1 for the production of poly(vinyl alcohol)/CuO nanocomposite films with enhanced optical, thermal and mechanical properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 28(12), 1823–1830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pat.4068>
- Mayilswamy, N., Jaya Prakash, N., & Kandasubramanian, B. (2023). Design and fabrication of biodegradable electrospun nanofibers loaded with biocidal agents. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 72(6), 433–459. <https://doi.org/10.1080/00914037.2021.2021905>
- Qi, Y., Zhai, H., Sun, Y., Xu, H., Wu, S., & Chen, S. (2021). Electrospun hybrid nanofibrous meshes with adjustable performance for potential use in soft tissue engineering. *Textile Research Journal*, 92(9–10), 1537–1549. <https://doi.org/10.1177/00405175211063904>
- Raffi, M., Mehrwan, S., Bhatti, T. M., Akhter, J. I., Hameed, A., Yawar, W., & ul Hasan, M. M. (2010). Investigations into the antibacterial behavior of copper nanoparticles against Escherichia coli. *Annals of Microbiology*, 60(1), 75–80. <https://doi.org/10.1007/s13213-010-0015-6>

- Raina, N., Pahwa, R., Khosla, J. K., Gupta, P. N., & Gupta, M. (2022). Polycaprolactone-based materials in wound healing applications. *Polymer Bulletin*, 79(9), 7041–7063. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03865-w>
- Sahooli, M., Sabbaghi, S., & Saboori, R. (2012). Synthesis and characterization of mono sized CuO nanoparticles. *Materials Letters*, 81, 169–172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.148>
- Saracino, E., Cirillo, V., Marrese, M., Guarino, V., Benfenati, V., Zamboni, R., & Ambrosio, L. (2021). Structural and functional properties of astrocytes on PCL based electrospun fibres. *Materials Science and Engineering: C*, 118, 111363.
- Saripek, F. B., Özyaytekin, İ., & Erci, F. (2023). Effect of ultrasound treatment on bacteriostatic activity of piezoelectric PHB-TiO_2 hybrid biodegradable scaffolds prepared by electrospinning technique. *Journal of Applied Polymer Science*, 140(6). <https://doi.org/10.1002/app.53437>
- Slavin, Y. N., Asnis, J., Häfeli, U. O., & Bach, H. (2017). Metal nanoparticles: understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *Journal of Nanobiotechnology*, 15(1), 65. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>
- Suganya, S., Senthil Ram, T., Lakshmi, B. S., & Giridev, V. R. (2011). Herbal drug incorporated antibacterial nanofibrous mat fabricated by electrospinning: An excellent matrix for wound dressings. *Journal of Applied Polymer Science*, 121(5), 2893–2899. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/app.33915>
- Wang, L., Gang, X., Xiao, Y., Ren, Y., Wang, J., Niu, B., & Li, W. (2023). Preparation of composite films composed of polyvinyl alcohol, shellac and carboxymethyl chitosan-CuO nanoparticles and their application in food preservation. *Journal of Polymer Research*, 30(2), 63. <https://doi.org/10.1007/s10965-023-03438-7>
- Wang, Y., Liu, Y., Qian, Y., Lv, L., Li, X., & Liu, Y. (2022). Characteristics of MgO/PCL/PVP antibacterial nanofiber membranes produced by electrospinning technology. *Surfaces and Interfaces*, 28, 101661. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101661>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.05.2023
Kabul Tarihi : 21.08.2023

Received Date : 02.05.2023
Accepted Date : 21.08.2023

FAY HATTI ÜZERİNDE DOĞRUDAN GAMA DOZ HIZI ÖLÇÜMÜ, YILLIK EFEKTİF DOZ EŞDEĞERİ VE YAŞAM BOYU KANSER RİSKİNİN HESAPLANMASI

DIRECT MEASUREMENT OF GAMMA DOSE RATE ON THE FAULT LINE, CALCULATION OF ANNUAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT, AND EXCESSIVE LIFETIME CANCER RISK

Serdar GÜMBÜR^{1*} (ORCID: 0000-0001-6213-1004)
Erdal KÜÇÜKÖNDER² (ORCID: 0000-0001-9661-1583)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

²Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Malzeme ve Malzeme İşleme Teknolojileri Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Serdar GÜMBÜR, sgumbur@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada amaç, Kahramanmaraş il sınırları içerisinde geçen Doğu Anadolu Fayının segmenti olan Gölbaşı-Türkoğlu üzerinde gama radyasyon doz hızını belirlemektir. İlave, söz konusu fay segmenti civarında yaşayan yetişkin insanlar için yıllık efektif doz eşdeğeri (YEDE) ve yaşam boyu kanser riski (YBKR) değerlerini hesaplamaktır. Bu amaçlar doğrultusunda, fay segmenti üzerinde ölçüm alınacak lokasyonlar belirlenmiştir. Bu lokasyonların dış mekanlarında taşınabilir cihaz olan ASP2e kullanılarak direkt gama doz hızı ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen gama doz hızı değerlerinin ortalaması 93,64 nGy/h olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, istasyon bölgelerinde yaşayan yetişkin insanlar için ortalama YEDE ve YBKR, sırasıyla 0,11 mSv/y ve $0,40 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Mevcut çalışma kapsamında hesaplanan ortalama gama doz hızı, YEDE ve YBKR uluslararası kuruluşlar tarafından önerilen sınır değerlerin üzerindedir.

Anahtar Kelimeler: Kahramanmaraş, gama doz hızı, yıllık efektif doz eşdeğeri, yaşam boyu kanser riski

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the gamma radiation dose rate on Gölbaşı-Türkoğlu, which is the segment of the East Anatolian Fault passing through the provincial borders of Kahramanmaraş. In addition, it is to calculate the annual effective dose equivalent (YEDE) and lifetime cancer risk (YBKR) values for adults living in the vicinity of the fault segment. In line with these purposes, the locations to be measured on the fault segment have been determined. Direct gamma dose rate measurements have been made using the portable device ASP2e in the outdoor areas of these locations. The average of the measured gamma dose rate values is calculated as 93.64 nGy/h. Also, the mean YEDE and YBKR for adult people living in station areas are calculated as 0.11 mSv/y and 0.40×10^{-3} , respectively. The average gamma dose rate, YEDE, and YBKR calculated within the scope of the current study are above the limit values recommended by international organizations.

Keywords: Kahramanmaraş, gamma dose rate, annual effective dose equivalent, excessive lifetime cancer risk

GİRİŞ

İnsanoğlu doğal ve yapay olarak devamlı şekilde gama radyasyona maruz kalmaktadır. Doğal gama radyasyonun büyük bir sebebi dünyamızdan daha yaşlı uranyum (^{238}U), toryum (^{232}Th) ve potasyum (^{40}K) elementinden kaynaklıdır. Bu elementlerden uranyum ve toryum seri halinde bulunarak kararlı hale gelinceye kadar bozunmaya devam ederek çevremize gama radyasyonu salmaya devam etmektedir. Potasyum elementi ise tabiatta tek başına bulunan ve doğal gama radyasyon düzeyinin artırıcı önemli elementlerden bir tanesidir. Doğal elementlerin dışında radyasyon düzeylerini artırıcı yapay elementlerde çevresel gama radyasyon miktarını artırmaktadır. UNSCEAR (2000) raporuna göre, maruz kalınan radyasyonun doğal kaynaklı oranları yaklaşık olarak %85 iken, %15 oranında ise yapay kaynaklıdır. Bütün bunlara ilaveten, kozmik ışınlar ve nükleer denemeler sebebiyle de çevresel gama radyasyon düzeyi artış göstermektedir.

Literatürdeki gama radyasyon düzeyini belirleme çalışmalarına bakıldığında, iki türden yöntem görülmektedir. Yöntemlerden bir tanesi topraktaki radyonüklid oranlarını tespit ederek belirli dönüşüm faktörlerini kullanarak yerden 1 m yükseklikteki gama radyasyon doz hızının tahmin edilmesi iken, diğer bir yöntem ise, taşınabilir radyasyon ölçüm cihazları ile yerden 1 metre yükseklikteki gama radyasyon doz hızlarını direkt olarak ölçme şeklinde olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerde, ortalama olarak insanlardaki hayati organların başladığı mesafenin 1 m olması sebebiyle, insanların bu mesafeden maruz kalacağı radyasyon düzeyini belirlemenin doğru olacağı düşüncesi kabul görmektedir. Literatürde birçok ülkede insanlar için dış mekan ve bina içi alanlardaki gama radyasyon dozlarının hesaplanmasıyla ilgili çalışmalar bulmak mümkündür (Jeelani vd., 2021; Jindal vd., 2018; Kobya vd., 2015; Gabdo vd., 2014; Karunakara vd., 2014; Rafique, 2013; Şahin vd., 2010; Taskin vd., 2009; War vd., 2009; Baykara ve Doğru, 2009; Degerlier vd., 2008; Bozkurt vd., 2007; Doğru vd., 2005).

Türkiye'nin deprem üreten en önemli tektonik yapılarından biri olan Doğu Anadolu fay hattı (DAF), Türkiye'nin güney doğusunda bulunan Bingöl iline bağlı Karlıova ilçesinden başlayarak çeşitli dallara ve segmentlere ayrılarak Türkiye'nin Akdeniz bölgesinde yer alan Hatay iline kadar uzanmaktadır. Bu fay hattı yaklaşık olarak 550 km uzunluğunda olup söz konusu fay hattının segmentlerinden biri olan Gölbaşı-Türkoğlu yaklaşık 90 km uzunluğundadır (Gümbür, 2022). Bu segmentin üzerinde yer alan en önemli büyük şehirlerden bir tanesi Kahramanmaraş'tır. Kahramanmaraş şehri Türkiye'nin nüfus bakımından 11. Büyük vilayeti konumundadır. TÜİK'in 2022 verilerine göre, şehrin toplam nüfusu 1.177.436 olup şehir merkezinde ise toplamda 650.000 civarında insan yaşamaktadır (TÜİK, 2022).

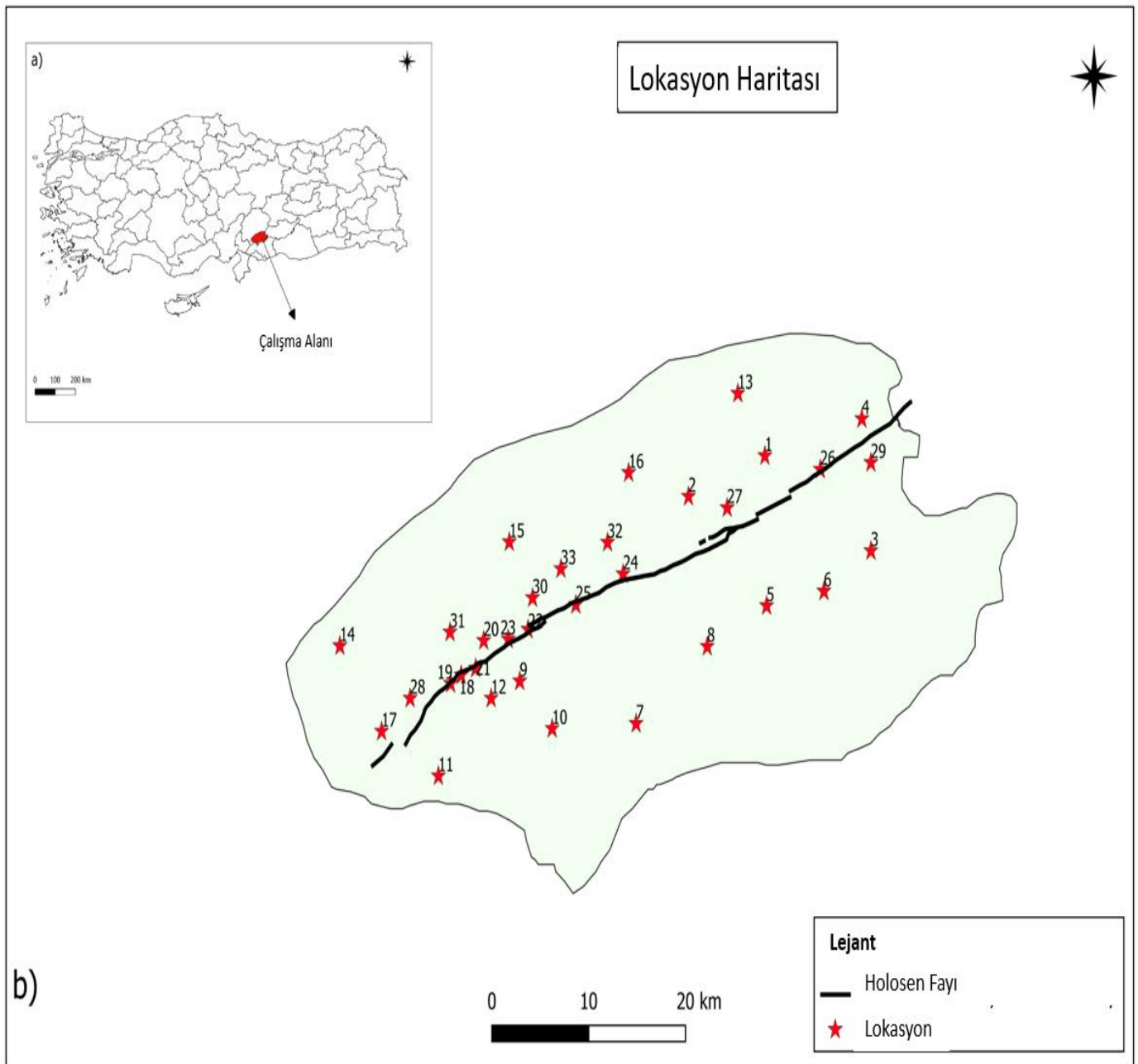
Kahramanmaraş şehri sanayisi ve diğer iş kollarıyla hızla gelişmekte olan ve ülke ekonomisine oldukça büyük katkıda bulunan bir il konumundadır. Böylesine önemli ve büyük insan popülasyonunun yaşadığı bir il ve çevresinde insanların hayatlarını etkileyebilecek riskli durumları tespit ederek bu durumlara karşı önlem alabilmek oldukça önemlidir. Bu ile ait gama radyasyon haritasını çıkartmak için yapılan Küçükönder tarafından yapılan çalışmada, il merkezindeki insanların yoğun bir şekilde yaşadığı mahallelerde gama radyasyon doz hızı ölçümlerinin ortalama değeri 53,50 nGy/h olarak belirlenmiştir (Küçükönder, 2009). Yine literatür taraması yapıldığında Karataşlı tarafından Kahramanmaraş'ın 118 farklı bölgesinde dış mekan gama radyasyon doz hızı değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir. Bu çalışmada dış mekan gama doz hızları 32,7 nGy/h ile 96,4 nGy/h arasındadır. Aritmetik ortalama değeri ise 64,8 nGy/h olarak belirlenmiştir. Ortalama yıllık efektif doz değeri 79,5 $\mu\text{Sv/y}$ olarak tahmin edilmektedir. İlaveten, ICRP 103, BEIR VII ve ICRP'ye göre tahmin edilen yaşam boyu kanser riski değerleri sırasıyla 0,032, 0,036 ve 0,040 olarak belirlenmiştir (Karataşlı, 2019).

Bu çalışmanın amacı, Kahramanmaraş il sınırları içerisinde yer alan DAF segmenti üzerindeki gama radyasyon doz hızı değerlerini tayin etmektir. Bu amaç çerçevesinde, daha önce herhangi bir gama radyasyon doz hızı değerlerinin ölçülmediği anlaşılan Gölbaşı-Türkoğlu segmentinin Kahramanmaraş il sınırları içerisindeki fay boyunca ve çevresindeki yakın yerleşim yerlerinin bulunduğu noktalarda yerden (bir) 1 metre yükseklikte direkt gama doz hızlarının ölçümleri, NaI proplu (SPA8) taşınabilir radyasyon izleme cihazı (ASP2e) kullanılarak yapılmıştır. Gama doz hızı değerleri üzerinden hesaplamalar yapılarak bu bölgede yaşayan yetişkin insanların yıllık efektif doz eşdeğerleri (YEDE) mSv/y birimde belirlenmiştir. Aynı zamanda bu bölgede yaşayan yetişkin insanlar açısından yaşam boyu kanser riskleri (YBKR) de hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında bulunan değerler, Türkiye'de ve diğer ülkelerde yapılan benzer çalışmalardaki değerlerle karşılaştırılarak sonuçlardaki farklılıkların sebepleriyle ilgili yorumlamalar yapılmıştır. İlaveten, çalışma kapsamında bulunan değerler, ulusal ve uluslararası kuruluşlar tarafından tavsiye edilen üst sınır değerleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Alanı

Bu çalışma Doğu Anadolu fay zonu segmenti olan Gölbashi-Türkoğlu segmenti üzerinde Kahramanmaraş şehri il sınırları içerisinde gerçekleştirilmiştir. MTA tarafından yayınlanmış olan Gaziantep NJ 37-9 paftalı diri fay haritasından yararlanılarak fay hattının geçtiği Kahramanmaraş il sınırları içerisinde yer alan bölgelerden toplamda 33 farklı lokasyon belirlenmiştir (Emre vd., 2012). Belirlenen lokasyonlar ve fay haritası şekil 1 de verilmektedir. Bu çalışma alanının jeolojik formasyonları da MTA tarafından yayınlanmış olan Hatay paftalı haritadan incelendiğinde, çalışma bölgesinde Eosen yaşlı karasal kırıntılar, Miyosen yaşlı kırıntılar ve karbonatlar, Mesozoyik yaşlı ayrılmamış bazik ve ultrabazik kayalar, pilyosen yaşlı karasal kırıntılar, Pilyosen-kuvaterner yaşlı ayrılmamış karasal kırıntılar, kuvaterner yaşlı ayrılmamış kuvaterner, Orta Triyas – Kretase yaşlı Neritik kireçtaşı ve Orta Triyas – Kretase yaşlı Pelajik kireçtaşı, radyolarit, çört, kırıntılılar vb. (yer yer ofiyolit dilimli) formasyonlarının bulunduğu görülmektedir (MTA, 2002). Ölçüm alınan lokasyonlar ve jeolojik formasyonları Tablo 1 de verilmektedir. Ayrıca çalışma alanının toprak yapısı 2016 yılında yayınlanmış olan Çed raporundan incelendiğinde; kahverengi Akdeniz toprağı, kahverengi topraklar, aluviyal topraklar ve kolluviyal topraklar olduğu görülmektedir (ÇED, 2006).



Şekil 1. a. Çalışma Alanı b. Lokasyonlar ve Fay Haritası

Tablo 1. Ölçüm Alınan Lokasyonlar ve Jeolojik Formasyonları

Lokasyon Numarası	Lokasyon	Simge	Açıklama	Yaş
1	Büyüknacar	m2	m2 (b): Kirintililer ve karbonatlar	Miyosen
2	Kuzucak	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
3	Salluşağı	e1	Karasal kirintililer	Eosen
4	Sakarkaya	m2	m2 (b): Kirintililer ve karbonatlar	Miyosen
5	Pazarcık	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
6	Ulubahçe	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
7	Narlı	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
8	Yolboyu	pl	pl (b): Karasal kirintililer	Pliyosen
9	Sivricehüyük	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
10	Abbaslar	of	Ayrılmamis bazik ve ultrabazik kayalar	Mesozoyik
11	Hacıbebek	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
12	Nevruzlu	of	Ayrılmamis bazik ve ultrabazik kayalar	Mesozoyik
13	Beşenli	m2	m2 (b): Kirintililer ve karbonatlar	Miyosen
14	Hopurlu	t2j	Neritik kireçtasi	Orta Triyas - Kretase
15	Karacasu Karaziyaret	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
16	Bulanık	m2	m2 (b): Kirintililer ve karbonatlar	Miyosen
17	Türkoğlu	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
18	Küpelikız	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
19	Kuyumcular	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
20	Kocalar Köyü	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
21	Öksüzlü	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
22	Kapıçam	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
23	Tevekkeli Köyü	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
24	Kartal	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
25	Çiğli	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
26	Karaağaç	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
27	Çamlıca	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
28	Kıllı	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
29	Soku	plQ	Ayrılmamis karasal kirintililer	Pliyosen - Kuvaterner
30	Güzelyurt	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
31	Şerefoğlu	Q	Q(a): Ayrılmamis Kuvaterner	Kuvaterner
32	Elmalar	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase
33	Çokyaşar	t2k	t2k (b): Pelajik kireçtasi, radyolarit, çört, kirintililer vb. (yer yer ofiyolit dilimli)	Orta Triyas - Kretase

Ölçümlerin Alınması

Ölçümler, belirlenen lokasyonlarda taşınabilir portatif bir cihaz olan ASP2e kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz alüminyum korumalı, eni ve boyu 0,025 m olan Sodyum İyodür (NaI) sintilatörlü bir radyasyon ölçüm aletidir. Bu aletin ölü zamanı ve çalışma aralığı sırasıyla, 36µs ve 40keV ile 1,3MeV arasındadır. Gama radyasyon doz hızı ölçümleri lokasyon olarak belirlenen noktalardaki dış mekanlarda yerden 1 m yükseklikte direkt olarak yapılmıştır. Lokasyonların her birinde toplam 3 ölçüm alınmıştır. Her bir ölçüm alım süresi 1 dakika olarak gerçekleştirilmiştir. Bu 3 ölçümün ortalaması alınarak µR/h biriminde gama radyasyon doz hızı değeri kaydedilmiştir (Eberline, 1995). Daha sonra, 8,76nGy=mR dönüştürme faktörü kullanılarak kaydedilen değerler nGy/h'ye birimine dönüştürülmüştür.

Yıllık Efektif Doz Eşdeğeri (YEDE)

Bir kişinin bir yıllık süre zarfında maruz kalacağı radyasyon dozu yıllık efektif doz eşdeğeri (YEDE) olarak tanımlanır. Bu değer eski birimi rem iken, SI birim sisteminde ise Sv (Sievert)'dir. Bunların dönüşüm faktörü 1Sv=100 rem'dir. Çeşitli ülkelerde gerçekleştirilen çalışmalarda ortalama enerjilere indirgenmiş çevresel gama ışınları için etkin dozun havadaki soğurulan doza eşdeğer oranı 0,7 Sv/Gy olarak alınmıştır (UNSCEAR, 1993). Binaların hem içindeki hem de dışındaki çevresel gama ışınları için bu değer kullanılır. YEDE hesaplanırken bilinmesi gereken bir diğer faktör de insanların bu gama ışınlarına ne kadar süre maruz kaldığıdır. Buna meşguliyet faktörü denir ve bir kişinin ne kadarlık bir sürede evde veya kapalı alanlarda zamanını geçirdiğini ifade eder. Mevcut çalışmada bir insanın zamanının yaklaşık %20'sini yapı dışı alanlarda geçireceği düşüncesiyle hesaplamalar yapılmıştır. Bu bilgiler ışığında insanın dış ortam ışınlanması ile alması gereken yıllık efektif doz eşdeğeri (YEDE) aşağıdaki formül 1 ile hesaplanır,

$$YEDE = ADMA \times DCF \times MF \times T \quad (1)$$

ADMA, havada ölçülen ortalama soğurulan doz (nGyh⁻¹); DCF, çevresel gama radyasyonlarının havadaki soğurulan doza oranı (0,7 Sv Gy⁻¹); MF, meşguliyet faktörü (dış mekan:0,2) ve T zamandır (8760 hy⁻¹) (UNSCEAR 1982).

Yaşam Boyu Kanser Riski

Yaşam boyu kanser riski (YBKR) formül (2) ile hesaplanmıştır. Hesaplama yıllık efektif doz eşdeğerlerine göre yapılmıştır.

$$YBKR = YEDE \times YS \times RF \quad (2)$$

YEDE, yıllık efektif doz eşdeğeri (Sv/yıl); YS, Yaşam süresidir (yıl); RF, ortalama yaşam beklentisi 70 yıl olanın bir risk faktörüdür (Sv⁻¹). Düşük dozlarda stokastik etkiler için ICRP, risk faktörünü 0,05 Sv⁻¹ olarak belirlemiştir (ICRP, 2007).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Tablo 2 'de 33 farklı noktada yerden 1 metre yükseklikte ölçülen gama doz hızı değerleri verilmektedir. Bu tabloya bakıldığında, gama doz hızı değerlerinin 49,2 ile 162,6 nGy/h arasında değiştiği, ortalama gama doz hızı değerinin ise 93,64 nGy/h olarak hesaplandığı görülmektedir. En yüksek gama doz hızı değeri 11 numaralı kuyumcular lokasyonunda ölçülür iken, en düşük gama doz hızı değeri ise 25 numaralı hacıbebek lokasyonunda ölçülmüştür. Bu lokasyonların jeolojik formasyonları kuvaterner yaşlı ayrılmamış kuvaterner'dir (MTA, 2002). Toprak yapısı olarak ise 3 farklı cins ile karşılaşmaktadır. Bunlar, kil içerikli ve potasyumca zengin Koluviyal toprak, kil ve taşındığı format içerikli fosfor ve potasyumca zengin aluviyal toprak ve içeriği granit, muhtelif metamorfikler, kil taşı, kum taşı, kireç taşı ve konglomeradan oluşan kırmızı kahverengi Akdeniz toprağıdır (ÇED, 2006). Sonuç olarak, bu lokasyonlarda aynı jeolojik formasyonlar bulunur iken farklı toprak türleri bulunması sebebiyle ölçülen değerler birbirlerinden farklı çıkmış olabilir.

Tablo 2'deki mevcut çalışmadaki gama doz hızı değerlerini UNSCEAR (2000) tarafından duyurulan dünya ortalama dış mekan gama doz hızı değeri 59 nGyh⁻¹ ile karşılaştırıldığında, ortalama gama doz hızı değerinin ve toplam 26 adet lokasyondaki gama doz hızı değerlerinin dünya ortalamasının üstünde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmadaki toplam 7 adet lokasyondaki gama doz hızı değerinin ise, dünya ortalamasının altında olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, çalışma alanı jeolojik yapısı sebebiyle mevcut çalışmadaki gama doz hızı değerlerinin çoğunlukla dünya ortalamasından yüksek olması beklenen bir durumdur.

Tablo 2. Gama Doz Hızı Değerleri, YEDE ve YBKR

Lokasyon Numarası	Lokasyon	Gama Doz Hızı (nGy/h)	YEDE mSv/y	YBKR×10 ⁻³	
1	Büyüknacar	85,2	0,10	0,37	
2	Kuzucak	75,4	0,09	0,32	
3	Sallıuşağı	65,1	0,08	0,28	
4	Sakarkaya	92,7	0,11	0,40	
5	Pazarcık	61,2	0,08	0,26	
6	Ulubahçe	55,4	0,07	0,24	
7	Narlı	58,9	0,07	0,25	
8	Yolboyu	52,3	0,06	0,22	
9	Sivricehüyük	97,6	0,12	0,42	
10	Abbaslar	51,7	0,06	0,22	
11	Hacıbebek	49,2	0,06	0,21	
12	Nevruzlu	98,3	0,12	0,42	
13	Beşenli	57,4	0,07	0,25	
14	Hopurlu	65,6	0,08	0,28	
15	Karacasu Karaziyaret	49,7	0,06	0,21	
16	Bulanık	62,3	0,08	0,27	
17	Türkoğlu	70,1	0,09	0,30	
18	Küpelikız	157,3	0,19	0,68	
19	Kuyumcular	162,6	0,20	0,70	
20	Kocalar Köyü	155,7	0,19	0,67	
21	Öksüzlü	152,5	0,19	0,65	
22	Kapıçam	149,3	0,18	0,64	
23	Tevekkeli Köyü	132,1	0,16	0,57	
24	Kartal	125,2	0,15	0,54	
25	Çiğli	142,1	0,17	0,61	
26	Karaağaç	133,7	0,16	0,57	
27	Çamlıca	95,8	0,12	0,41	
28	Kılılı	88,3	0,11	0,38	
29	Soku	95,7	0,12	0,41	
30	Güzelyurt	101,4	0,12	0,44	
31	Şerefoğlu	95,3	0,12	0,41	
32	Elmalar	72,4	0,09	0,31	
33	Çokyaşar	82,7	0,10	0,35	
Min	19	Kuyumcular	162,6	0,06	0,21
Max	11	Hacıbebek	49,2	0,20	0,70
Average		93,64	0,11	0,40	

YEDE: Yıllık efektif doz eşdeğeri

YBKR: Yaşam boyu kanser riski

Bazı ülkelerde yapılan araştırmalarda dış mekanlardaki gama doz hızı değerleri UNSCEAR (2000) tarafından açıklanmıştır. Buna göre; Çin, Mısır, Yunanistan, Hindistan, Japonya ve Rusya'da belirlenen gama doz hızı değerleri sırasıyla, 62 nGy⁻¹, 32 nGy⁻¹, 56 nGy⁻¹, 56 nGy⁻¹, 53 nGy⁻¹ ve 65 nGy⁻¹ şeklindedir (UNSCEAR, 2000). Bu değerler, mevcut çalışmada ölçülen ortalama dış mekan gama doz hızı değerinden (93,64 nGy⁻¹) daha düşüktür. Çalışmalarda ölçülen gama doz hızlarının birbirinden farklı olmasının nedeni, toprak ve kaya türlerindeki radyonüklid konsantrasyonlarındaki farklılıklardan kaynaklanabilir. Ayrıca, çalışmaların yapıldığı yerlerdeki rakım farklılıklarından, yerleşim yerlerine mesafesine göre ölçülen değere etki eden elektromanyetik dalga etkilerinin az ya da çok olmasından ve böylece elektromanyetik yansımaların sığ ya da yoğun olmamasından kaynaklanıyor olabilir. İlaveten, ölçüm yerlerinde meydana gelen havadaki kirlilik nedeniyle; havadan toprağa çöken partiküllerin farklı miktarlarda olması sebebiyle de kaynaklanıyor olabilir (Şahin vd., 2010).

Tablo 3 de, mevcut araştırmanın gama doz hızı değeri literatürdeki önceki çalışmalarla karşılaştırılmaktadır. Buna göre, mevcut çalışmanın ortalama dış mekan gama doz hızı, Adana'da (Degerlier vd., 2008) ve Kastamonu'da (Kam ve Bozkurt, 2007) yapılan çalışmalardan daha yüksektir. Karataşlı'nın çalışmasına göre, Kahramanmaraş şehir merkezi için dış mekan gama doz hızı değerleri 32,7 nGy/h ile 68,8 nGy/h arasında değişmekte olup, aritmetik ortalama 56 nGy/h'dır (Karataşlı, 2019). Küçükönder tarafından yapılan çalışmada Kahramanmaraş İl merkezinde toplam 29 mahallede belirlenen noktalarda 31,57 ile 68,41 nGy/h arasında değişmekte iken, ortalama değeri ise 53,50 nGy/h olarak belirlenmiştir (Küçükönder, 2009). Bu çalışmalardaki değerler beklenildiği gibi mevcut çalışmadaki

değerlerden düşüktür. Bununla birlikte, mevcut çalışmadaki gama doz hızı değeri (Jindal vd., 2018) ve (Jeelani vd., 2021) tarafından yapılan çalışmaların değerlerinden düşüktür. Diğer çalışmalarda yüksek yada düşük gama doz hızı değerlerinin ölçülmesinin nedeni, çalışma alanlarının jeolojik oluşumlarından kaynaklanıyor olabilir. Ayrıca, (Karunakara vd., 2014) ve (Rafique, 2013) tarafından yapılan çalışmalarda değer ile mevcut çalışmadaki değer uyumludur. İlaveten, Doğu Anadolu fay hattı üzerinde (Baykara ve Doğru, 2009) tarafından yapılan çalışmadaki değerler ile de beklenildiği gibi mevcut çalışmadaki değerler uyumludur. Buradan anlaşılıyor ki, genel olarak mevcut çalışma verilerinin literatür ile uyumlu olması sonuçların doğru olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 3. Gama Doz Hızı Değerlerinin (nGyh⁻¹) Literatür ile Karşılaştırılması

Ülke/Bölge	Gama Doz Hızı (nGy/h)	
	Bina Dışı	Kaynak
Türkiye/Kastamonu	48,03	(Kam ve Bozkurt, 2007)
Türkiye/ KuzeyAnadolu Fay Sistemi	87,8	(Baykara ve Doğru, 2009)
Türkiye/ Doğu Anadolu Fay Sistemi	105,1	
Türkiye/Adana	67	(Degerlier vd., 2008)
Malezya/Pahang	176	(Gabdo vd., 2014)
Batı Himalaya Hindistan/	126,1	Jeelani vd., 2021)
Chhattisgarh'ın Balod Bölgesi	143,6	(Jindal vd., 2018)
Güney Hindistan Azad Keşmir /Muzaffarabad şehrinin eyalet başkenti,	97	(Karunakara vd., 2014)
	81,14	(Rafique, 2013).
Türkiye/Kahramanmaraş	56	(Karataşlı, 2019)
Türkiye/Kahramanmaraş	53,5	(Küçükönder, 2009)
Dünya Ortalama	59	(UNSCEAR, 2000)
Türkiye/Kahramanmaraş	93,64	Mevcut çalışma

Dış mekanda hesaplanan yıllık efektif doz eşdeğeri (YEDE) Tablo 1 de verilmektedir. Buna göre, hesaplanan YEDE incelediğinde, yerden 1 m yükseklikte hesaplanan YEDE 0,06 mSv/y ile 0,20 mSv/y aralığındadır. Ortalama YEDE ise 0,11 mSv/y'dir. Hesaplanan YEDE'nin tamamı, UNSCEAR (2000) tarafından dış mekan alanalar için 0,07 mSv/y olarak açıklanan dünya ortalama değerinden yüksektir.

Mevcut çalışma kapsamında hesaplanan yaşam boyu kanser riski (YBKR) değerleri Tablo 1 de verilmektedir. Buna göre, YBKR değerleri $0,21 \times 10^{-3}$ ile $0,70 \times 10^{-3}$ aralığındadır. Ortalama YBKR değeri ise $0,40 \times 10^{-3}$ 'tür. Bu ortalama ve diğer hesaplanan YBKR değerlerinin tamamı, UNSCEAR (2000) tarafından açıklanan $0,29 \times 10^{-3}$ dünya ortalama değerinden daha yüksektir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın sonucu olarak çalışma bölgesinde direkt gama doz hızı değerleri ölçülmüş, YEDE ve YBKR hesaplanmıştır. Çalışma kapsamındaki noktalarda dış mekanda ölçülen ortalama gama doz hızı değerleri dünya ortalamasının üzerindedir. Bu bölgede yaşayan yetişkin insanlar için hesaplanan YEDE ve YBKR değerleri de dünya ortalamasının üzerindedir. İnsanların toplam YEDE ve toplam YBKR değerlerinin hesaplanabilmesi için bina içi gama doz hızlarının da ölçülmesi gerekmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın devamı olması açısından çalışma alanının genişletilerek ölçümlere devam edilmesini öneriyoruz. Gama radyasyon doz oranlarının yüksek olduğu bölgelerde gerekli önlemler uygulanmalı ve iyileştirmeler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Baykara, O., & Doğru, M. (2009). Determination of terrestrial gamma, 238U, 232Th and 40K in soil along fracture zones. *Radiation Measurements*, 44(1), 116-121.
- Bozkurt, A., Yorulmaz, N., Kam, E., Karahan, G., & Osmanlioglu, A. E. (2007). Assessment of environmental radioactivity for Sanliurfa region of southeastern Turkey. *Radiation Measurements*, 42(8), 1387-1391.
- ÇED, (2006). Kahramanmaraş ili Çevre Durum Raporu, Kahramanmaraş Valiliği il ve Çevre Orman Müdürlüğü, Kahramanmaraş.
- Degerlier, M., Karahan, G., & Ozger, G. (2008). Radioactivity concentrations and dose assessment for soil samples around Adana, Turkey. *Journal of environmental radioactivity*, 99(7), 1018-1025.
- Doğru, M., Canbazoğlu, C., Çelebi, N., & Kopuz, G. (2005). Measurement of radon concentration in different constructed houses and terrestrial gamma radiation in elazığ, Turkey. In *Recent Advances in Multidisciplinary Applied Physics* (pp. 859-863). Elsevier Science Ltd.
- Eberline (1995). ASP-2/2e Portable Radiation Monitor Technical Manual. https://www.nukeworker.com/study/instruments/manuals/Thermo_ASP-2E.pdf -(Erişim tarihi 26 Nisan 2023).
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Elmacı, H., Özalp, S. (2012). 1:250.000 Ölçekli Türkiye Diri Fay Haritası Serisi, Gaziantep (NJ 37-9) Paftası. Seri No: 38, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Gabdo, H. T., Ramli, A. T., Sanusi, M. S., Saleh, M. A., & Garba, N. N. (2014). Terrestrial gamma dose rate in Pahang state Malaysia. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 299, 1793-1798.
- Gümbür, S. (2022). *Gölbaşı-Türkoğlu Fay Segmenti Üzerinde Radon Gazı Değişimlerinin Deprem İle İlişkisi*. Efe Akademi Yayınları.
- ICRP (2007). International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Elsevier, ISBN 978-0-7020-3048-2.
- Jeelani, G., Hassan, W., Saleem, M., Sahu, S. K., Pandit, G. G., & Lone, S. A. (2021). Gamma dose monitoring to assess the excess lifetime cancer risk in western Himalaya. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 328, 245-258.
- Jindal, M. K., Sar, S. K., Singh, S., & Arora, A. (2018). Risk assessment from gamma dose rate in Balod District of Chhattisgarh, India. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317, 387-395.
- Kam, E., & Bozkurt, A. (2007). Environmental radioactivity measurements in Kastamonu region of northern Turkey. *Applied Radiation and Isotopes*, 65(4), 440-444.
- Karataşlı, M. (2019). Determination of outdoor absorbed gamma dose rates of Kahramanmaraş province, Turkey. *Cumhuriyet Science Journal*, 40(1), 102-107.
- Karunakara, N., Yashodhara, I., Kumara, K. S., Tripathi, R. M., Menon, S. N., Kadam, S., & Chougankar, M. P. (2014). Assessment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India—a comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements. *Results in Physics*, 4, 20-27.
- Kobyay, Y., Taşkın, H., Yeşilkanat, C. M., & Çevik, U. (2015). Evaluation of outdoor gamma dose rate and cancer risk in Artvin province, Turkey. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(8), 2077-2085.
- Küçükönder, E. (2009). Kahramanmaraş yöresinde doğal radyoaktivitenin tayini. Doktora Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Kahramanmaraş 69s.
- MTA (2002). Maden Araştırma ve Arama Genel Müdürlüğü. 1/500.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Hatay Haritası, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Daire Başkanlığı, Editör: Mustafa ŞENEL (2002) <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/doc/HATAY.pdf> - (Erişim tarihi 07/08/2023).
- Rafique, M. (2013). Ambient indoor/outdoor gamma radiation dose rates in the city and at high altitudes of Muzaffarabad (Azad Kashmir). *Environmental earth sciences*, 70(4), 1783-1790.
- Şahin, S., Niksarlıoğlu, S., & Yılmaz, M. (2010). Fırat Üniversitesi (Elazığ) Kampusunda Çevresel Gama Radyasyonunun Ölçülmesi. *Fırat University Journal of Science*, 22(2).

Taskin, H., Karavus M., Ay P., Topuzoglu A., Hidiroglu S., & Karahan G. (2009). Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey. *Journal of environmental radioactivity* 100(1):49-53.

TİK (2022). Türkiye İstatistik Kurumu. İl ve ilçelere göre il/ile merkezi, belde/ky nfusu ve yıllık nfus artış hızı, 2022. <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Adrese-Dayali-Nufus-Kayit-Sistemi-Sonuclari-2022-49685> (Erişim Tarihi: 0708/2023)

UNSCEAR (1982) Ionizing radiation: sources and biological effects. United Nations Scientific Committee on the effects of atomic radiation. United Nations Publication, New York

UNSCEAR (1993). Report, United Nations Scientific Committee on The Effects of Atomic Radiation Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiations. New York.

UNSCEAR (2000). Report of the United Nations scientific committee on the effects of atomic radiation, sources, effects, and risks of ionizing radiation. United Nations Sales Publication, New York

War, S. A., Nongkynrih, P., Khathing, D. T., & Iongwai, P. S. (2009). Assessment of indoor radiation level in the environs of the uranium deposit area of West Khasi Hills District, Meghalaya, India. *Journal of environmental radioactivity*, 100(11), 965-969.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.05.2023
Kabul Tarihi : 04.09.2023

Received Date : 16.05.2023
Accepted Date : 04.09.2023

İPLİĞİ BOYALI PAMUKLU KUMAŞLARDA AĞARTMA İŞLEMİNİN MUKAVEMETE VE RENK FARKINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BLEACHING PROCESS ON STRENGTH AND COLOR DIFFERENCE IN YARN DYED COTTON FABRICS

Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ^{1*}(ORCID: 0000-0002-3355-0645)
Feyza AKARSLAN KODALOĞLU²(ORCID: 0000-0002-7855-8616)

¹ Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tekstil Teknolojisi Programı, Denizli, Türkiye
² Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ, gsimsek@pau.edu.tr

ÖZET

Günümüzde ekolojik ve ekonomik üretim çok daha fazla önem kazanmıştır. Klasik ağartma yöntemlerinin su ve enerji kullanımının yüksek olması nedeniyle ekolojik ve ekonomik açıdan incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca ağartma işleminde tekstil materyaline zarar vermeden istenilen rengin elde edilmesi de önemlidir. Çalışmada ağartmalı ve ağartmasız proses ile iki farklı renkte boyanan ipliklerden kumaş dokunmuştur. Kumaşların kopma mukavemeti ve yırtılma mukavemeti ölçülmüş, ağartmalı ve ağartmasız boyama prosesleri arasındaki fark istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ağartma işlemi yapılarak boyanan ipliklerden elde edilen kumaşların kopma ve yırtılma mukavemetlerinin istatistiki olarak daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca ağartmasız boyama prosesi ile boyanan ipliklerden üretilen iki farklı renk kumaşın renk farkı değerleri incelenmiştir. Koyu renkli kumaşlarda ölçülen renk farkı değeri kabul edilebilir aralıkta çıkmıştır. Açık renkli kumaşlarda ölçülen renk farkı değeri kabul edilebilir aralığın dışında çıkmıştır. Özellikle açık renkli boyamalarda klasik ağartma yöntemleri dışında, tekstil materyaline zarar vermeden istenilen rengin elde edildiği, ekonomik, ekolojik ve sürdürülebilir ağartma yöntemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Anahtar kelimeler: Ağartma, kopma mukavemeti, yırtılma mukavemeti, renk farkı (ΔE)

ABSTRACT

Today, ecological and economic production has gained much more importance. Due to the high water and energy consumption of conventional bleaching methods, they need to be examined from both ecological and economic perspectives. Additionally, it is important to obtain the desired color without damaging the textile material in the bleaching process. In this study, fabric was woven from yarns dyed in two different colors using bleached and unbleached processes. The breaking strength and tear strength of the fabrics were measured, and the difference between bleached and unbleached dyeing processes was statistically analyzed. Fabrics obtained from yarns dyed after the bleaching process were found to have statistically lower breaking and tear strengths. Furthermore, the color difference values of two different color fabrics produced from yarns dyed with the unbleached dyeing process were examined. According to the results, the color difference value measured on dark colored fabrics was within an acceptable range. The color difference value measured on light-colored fabrics exceeded the acceptable range. Especially for light-colored dyeing, beyond classical bleaching methods, it is necessary to develop economical, ecological and sustainable bleaching methods that achieve the desired color without damaging the textile material.

Keywords: Bleaching, breaking strength, tear strength, color difference (ΔE)

ToCite: ŞİMŞEK GÜNDÜZ, G., & AKARSLAN KODALOĞLU, F., (2023). İPLİĞİ BOYALI PAMUKLU KUMAŞLARDA AĞARTMA İŞLEMİNİN MUKAVEMETE VE RENK FARKINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 843-852.

GİRİŞ

Tüm sektörlerde olduğu gibi tekstil sektöründe küreselleşen dünyada başarılı olmanın en önemli şartı rekabet edebilme gücüne sahip olmaktır. Üretimde maliyetlerin düşürülmesi, verimliliğin artırılması rekabet gücünü arttıran faktörlerdendir. Bu artış, üretimde, ihracatta gelişmeyle sonuçlanmakta, karlılık artmakta, böylece yatırımlarda hızlanmakta ve istihdam artmaktadır (Adıgüzel, 2011). Türk tekstil sektörü gittikçe yoğunlaşan rekabet ortamında başarılı olmak için üretimini, ürün kalitesini ve rekabet gücünü arttırmak zorundadır (Kaya ve Oduncu, 2016; Kaya, 2013). Rekabet gücünü arttıran bir diğer faktör çevreye duyarlı üretimdir. Çevresel kirlilik ve kaynak kullanımı konusunda dünya kapasitesi aşılmaya başlamıştır. Çevresel kirliliğin olumsuz etkileri kendisini tüm dünyada göstermektedir. Bu olumsuzluklara katkı sağlayan sektörlerden en önemlilerinden biri, üretim ve üretim sonrası aşamalarda önemli derecede çevresel problemlere yol açabilecek zararlı atıkların ortaya çıktığı tekstil sektörüdür. Dünyada tekstil sektöründe hem üretim artışı beklentisi hem de çevreye duyarlı üretim önemli hale gelmiştir (Güngör ve Felekoğlu, 2018). Çevre bilinciyle sürdürülebilir malzeme ve üretim yöntemlerinin kullanılması, tercih edilmesi gerekmektedir (Batur ve Kozbekçi Ayranpınar, 2021). Dolayısıyla tekstil üretim aşamalarında düşük maliyetli, kaliteli ve çevreye duyarlı ürünler üretmek son zamanlarda daha önemli hale gelmiştir.

Pamuk, selüloz (%90-96) ve yabancı maddelerden (%4-10) oluşan kahverengi ve sarımsı renkli doğal bir liftir (Akyol vd, 2022). Pamuk liflerinde, renkli safsızlıkları gideren bir ön terbiye işlemi olan ağartma işleminde ağırlıklı olarak hidrojen peroksit kullanılmaktadır. Klasik ağartma işlemlerinden biri olan hidrojen peroksit ağartmasında yüksek miktarda yardımcı kimyasal madde kullanıldığından atık su yükü yüksek olmaktadır. Ayrıca ağartma işlemi klasik ağartma yöntemleri ile yapıldığında uzun süre ve fazla enerji tüketimi gibi olumsuzluklarla karşılaşmaktadır (Mistik, 2003). Klasik yöntemlerden farklı olarak ozonun kullanıldığı bir çalışmada bu yöntemin diğer ağartma yöntemlerine göre atık madde açığa çıkarmaması, çevreye zararlı olmaması, enerji ve su tasarrufu sağlaması, yıkama kimyasallarının miktarını düşürmesi avantajlı yönleri olarak öne çıkartılmaktadır (Öztürk ve Eren, 2010). Benzer şekilde Eren ve Çeven çevresel yük değerlendirilmesi açısından KOİ (kimyasal oksijen ihtiyacı) testlerini yapmışlar ve ozonla muamelenin hidrojen peroksit ağartmasına göre daha düşük çevresel etki yarattığını göstermişlerdir (Eren ve Çeven, 2018). Bir başka çalışmada peroksit ağartmasında katyonik ağartma aktivatörü kullanılarak daha çevreci bir proses optimize edilmiştir (Polat, 2013). Pamuğun ağartma işlemini de içeren klasik ön terbiyesi çok fazla iş yüküne ve bunun bir sonucu olarak fazlasıyla çevresel yüke sahiptir. Bu nedenle çok fazla miktarda temiz su ile kimyasal madde tüketilen pamuk ön terbiye işlemleri için alternatif yöntem arayışları her geçen gün daha da artmaktadır (Yüksel, 2022). Bu çalışmada ipliği boyalı pamuklu kumaşlarda klasik ağartma işleminin mukavemete ve renk farkına etkisi incelenmiş, böylece tekstil işletmelerinde en fazla tercih edilen hidrojen peroksit ağartmasının olumlu ve olumsuz tarafları analiz edilmeye çalışılmıştır.

Literatürde ağartma ile ilgili çalışmalara bakıldığında klasik yöntemle alternatif olan çevreye duyarlı yöntemler üzerinde çalışmaların ağırlık kazandığı söylenebilmektedir. Tavcer pamuklu havlu kumaş kullanarak enzimatik ön terbiye işlemlerinin etkisini araştırmıştır. Enzimatik ön işlem ve perasetik asit ağartmasında daha az enerji ve su kullanıldığı ancak daha düşük beyazlık elde edildiği tespit edilmiştir (Tavcer, 2013). Eren vd. ağartmada lakkaz enzimi ve ozon kullanmışlar, beyazlık etkisinin ozondan kaynaklandığını göstermişlerdir. Ozon ile muamele edilmiş numunenin beyazlık değeri ilave hidrojen peroksit ağartması ile klasik peroksit ağartmasında ulaşılan değerlere ulaşmıştır. Bu durumda kullanılan hidrojen peroksit miktarı klasik yöntemle göre düşürülmüş, dolayısıyla daha yüksek mukavemet değerleri elde edilmiştir (Eren vd. 2009). Eren ve Çeven bobin formundaki pamuk ipliklerinin ozon gazı ile ağartılmasının çevre dostu bir yöntem olarak klasik ağartma işlemine alternatif olabileceğini düşünmektedir. Klasik ağartma ile karşılaştırıldığında elde edilen beyazlık değerlerinin düşük ancak kayda değer olduğu belirtilmiştir. Ayrıca bobinlerde bekleme sırasında sonradan sararma oluşmuş bu nedenle ilave kimyasal madde ihtiyacı doğmuştur. Kimyasal oksijen ihtiyacının ozonla muamelede klasik hidrojen peroksit ağartmasına göre daha düşük olduğu görülmüştür (Eren ve Çeven, 2018). Benli ve Bahtiyari çalışmalarında, pamuklu kumaşların ağartılmasını farklı hidrojen peroksit-ozon kombinasyonları ile gerçekleştirmiş, kumaşları doğal boyarmadde kaynakları ile boyamışlardır. Böylece çevre dostu bir terbiye yöntemi önermişlerdir (Benli ve Bahtiyari, 2016). Ağartma prosesinde kimyasal yerine Ozon ve Lazer teknolojisinin kullanılmasının çevresel açıdan önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kimyasal ile ağartma yapılan geleneksel yöntemlere göre yüksek oranda su ve kimyasal tasarrufu yapabilmenin mümkün olduğu belirtilmiştir (Öztürk, 2018). Soydaş ozonlama ile yapılan ağartma işlemlerinde zamanla beyazlık derecesinde düşüş gözlemlendiğini belirtmiştir (Soydaş, 2016).

Erişmiş ve Eren, ultrason kullanımının çevreye duyarlı bir yöntem olduğunu belirtmişler ve bu teknolojinin tekstil terbiyesinin farklı işlemlerinde kullanımı hakkında çalışmışlardır (Erişmiş ve Eren, 2010). Pamuklu kumaşların hidrojen peroksit ile ağartılmasında ultrason kullanımının işlem süresini azalttığı, ağartma hızını arttırdığı, kumaşın beyazlık derecesinin klasik ağartma işlemine göre daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Koçak ve Merdan, 2002). Mansuri vd. pamuklu kumaşların ağartılmasında ultraviyole teknolojisini kullanmışlar, geleneksel emdirme-buharlama yöntemine göre kabul edilebilir mukavemet kaybı oluşurken yeterli derecede beyazlık elde edilebileceği sonucuna ulaşmışlardır (Mansuri, Khoddami ve Rezaei, 2011).

Gürsoy ve Hauser enerji maliyetlerini düşürerek, verimliliği yükseltmek amacıyla ağartma aktivatörleri kullanarak çevreye duyarlı bir proses üzerine çalışmışlardır. Çalışmada bir gruba hidrojen peroksit ağartması uygulanarak, diğer gruba aynı reçeteye ağartma aktivatörleri ilave edilerek kumaşlar boyanmıştır, çalışma sonucunda aktivatörlü ağartmadan elde edilen mukavemet değerlerinin daha yüksek ve elde edilen renk değerlerinin yeterli olduğu belirtilmiştir (Gürsoy ve Hauser, 2010). Ledakowicz vd., hidrojen peroksiti gaz fazında kullanarak bir ağartma yöntemi sunmaktadırlar. Bu yöntemin çevre dostu olduğu, düşük sıcaklıkta atık su oluşturmadan işlemin gerçekleştirilebileceği söylenmektedir. İşlem ile elde edilen numunenin beyazlık derecesinin kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir (Ledakowicz vd., 2015). Özbey vd., sürdürülebilir ve temiz üretime imkân sağlayacak doğal bir madde olan bentonitin pamuklu kumaş üzerindeki ağartma etkisini araştırmışlar, bentonitin ağartma etkisinin tek başına yeterli olmadığını ancak miktarı arttıkça beyazlık indeksi ve patlama mukavemeti açısından olumlu sonuçlar görüldüğünü belirtmişlerdir (Özbey, Şahinbaşkan ve Erdoğan, 2019). Eren vd., ilk defa pamuğun süperkritik karbondioksit akışkan ortamında hidrofilleştirilmesini ve ağartılmasını araştırmışlardır (Eren vd., 2018). Süperkritik karbondioksit yönteminde özellikle pamuğun ağartılması denemeleri ile daha çevre dostu bir üretim için umut verici sonuçlar elde edilmiştir (Saka, 2019). Gedik pamuk/lyocell karışımı selülozik kumaşların TiO₂ varlığında ultraviyole (UV) ışığıyla ağartılması üzerine bir araştırma yapmıştır, elde edilen sonuçları hidrojen peroksitle yaptığı uygulamalarla karşılaştırılmıştır. Böylece minimum kimyasal tüketimiyle çevreye duyarlı alternatif bir ağartma yöntemi ortaya koymuştur (Gedik, 2020).

Gündüz ve Akarlan bobin halinde boyanan ipliklerde hidrojen peroksit ile ağartma işleminin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada masuraların boya geçiren alanını ifade eden yararlı yüzey katsayısı (YYK) Fettahov vd.'nin 2005 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada verilmiş olan denklem yardımıyla hesaplanmış ve 0,44 olarak bulunmuştur (Fettahov vd., 2005). Hidrojen peroksit miktarının azaltılması ile iplik mukavemet değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu durum dokuma işleminde iplik kopuşların azaltılması dolayısıyla verimliliğin artırılması için umut vericidir. Aynı şekilde peroksit miktarının azaltılması ile atık suyun kimyasal oksijen ihtiyacı değerinin azaldığı görülmüş, dolayısıyla ekolojik açıdan önemi üzerinde durulmuştur. Hidrojen peroksitin azaltılmasıyla elde edilen haslıkların iyi olduğu ancak açık ve orta renk boyamalarda istenilen renkten sapmalar yaşandığı belirtilmiştir. Bu bağlamda boya geçiren alanı daha yüksek boyama patronları kullanılarak ipliklerin açık ve orta renklerde istenilen renkte verimli ve ekolojik bir şekilde boyanabileceği söylenmiştir (Gündüz ve Akarlan, 2018).

Geleneksel ağartma yöntemleri su ve enerji kullanımının yüksek olduğu yöntemlerdir. Günümüzde hem ekolojik hem de ekonomik üretim yapılması artık bir gereklilik haline gelmiştir. Ağartma prosesi ile ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında bu iki parametre dışında tekstil materyaline zarar vermeden istenilen rengin elde edilmesi üzerinde durulmaktadır. Bu çalışmada ağartmalı ve ağartmasız iki farklı boyama prosesi ile iplikler bobin halinde açık (bej) ve koyu (lacivert) tonlarda boyanmıştır. Bu ipliklerden kumaşlar dokunmuştur. Kumaşların kopma mukavemeti ve yırtılma mukavemeti ölçülmüştür. Ayrıca ağartmasız boyama prosesi ile boyanan ipliklerden üretilen kumaşların renk farkı değerleri ölçülmüştür. Böylece ipliği boyalı kumaşlarda ağartma işleminin kumaş mukavemetine etkisi değerlendirilmiş, ayrıca renk farkı değeri ile ağartma işleminin renk bazında önemi görülmüştür.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Aynı harmandan Ne 30 numaralı %100 pamuk ipliklerinden oluşturulan bobinlerin mukavemet, numara, düzgünlük ve yoğunluk sonuçlarının ortalamalarının karşılaştırılarak, ortalamalar arasındaki farkın belirli bir güven düzeyinde anlamlı olup olmadığını test etmek amacıyla tek yönlü varyans analizi (One-way ANOVA) yapılmıştır. Tablo 1'den görüldüğü üzere bobin faktörünün seviyeleri arasındaki farklar istatistiki olarak önemli bulunmamıştır ($P > 0,05$). Bu sonuçlara göre çalışmada kullanılan ipliklerin özelliklerinin ve bobinlerin sarım yoğunluklarının birbirine benzer olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 1. Tek yönlü varyans analizi sonuçları

Faktör	Bağımlı Değişken	Ortalama	P
Bobin	Mukavemet (cN/tex)	13,60	0,342
	Numara (Ne)	29,50	0,526
	Düzensizlik (%CV)	10,92	0,765
	Yoğunluk (gr/cm ³)	0,36	0,437

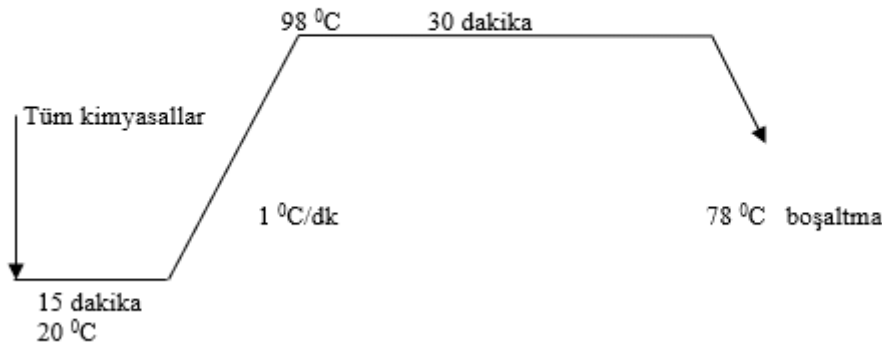
Bobinler açık ve koyu renk olmak üzere iki farklı renkte reaktif boyarmadde ile boyanmıştır. Boyanmış ipliklerden dokuma yapılarak kumaşlar elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan ipliği boyalı kumaşın özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. İpliği Boyalı Kumaşın Özellikleri

Çözümlü İplik Numarası	Atkı İplik Numarası	Çözümlü Lif Cinsi	Atkı Lif Cinsi	Örgü Raporu	Çözümlü Sıklığı (tel/cm)	Atkı Sıklığı (tel/cm)	Gramaj gr/m ²
30 Ne	30 Ne	Pamuk	Pamuk	D 3/1 Z	60	32	230

Metot

İplik bobinleri aynı harmandan karde iplik eğirme sistemleriyle üretilmiştir. SSM TW2-W Digicone çapraz sarım makinesi ile boyama bobinleri oluşturulmuştur. Bobin yoğunluğu 0,36 gr/cm³’tür. İki deney grubu oluşturularak, bir gruptaki bobinler ağartma işlemi yapılarak, bir gruptaki bobinler ağartma işlemi yapılmadan boyanmıştır. Bobinlerin ağartma, boyama ve yıkama işlemleri Thies markalı HT bobin boyama makinesi ile yapılmıştır. Ağartma maddesi olarak hidrojen peroksit, boyama maddesi olarak reaktif boyarmadde kullanılmıştır. Her bir deney grubunda koyu (lacivert) ve açık (bej) renklerde boyamalar yapılmıştır. Bobinlere uygulanan ağartma grafiği Şekil 1’de, ağartma reçetesi Tablo 3’de verilmektedir.

**Şekil 1.** Ağartma Grafiği**Tablo 3.** Ağartma Reçetesi

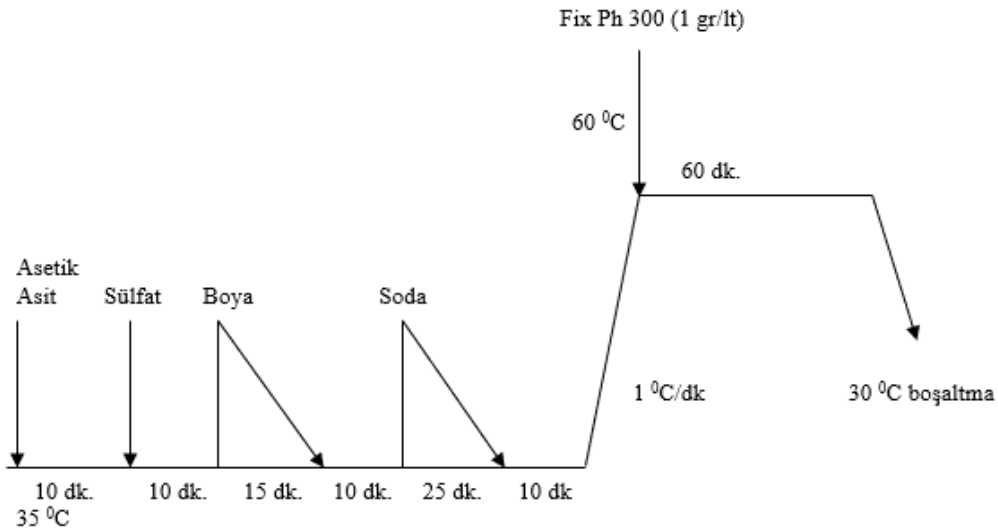
Madde	Miktar
Yüzey aktif madde	0,6 gr/lit
İyon tutucu	0,25 gr/lit
Stabilizatör	0,3 gr/lit
Kostik (NaOH)	2,2 gr/lit
Hidrojen peroksit	2 gr/lit

Ağartmadan sonra yıkama işlemi gerçekleştirilmiştir. Öncelikle sadece içten dışa 80°C'de 5 dakika sıcak yıkama yapılmıştır. Ardından 0,3 gr/lt katalaz enzimi kullanılarak içten dışa ve dıştan içe 50°C'de 15 dakika işlem yapılmıştır. Son olarak sadece içten dışa 5 dakika durulama yapılmıştır. Yıkamadan sonra iplikler boyanmıştır. Tablo 4'te lacivert ve bej renk boyama reçeteleri verilmektedir.

Tablo 4. Lacivert ve Bej Renk Boyama Reçeteleri

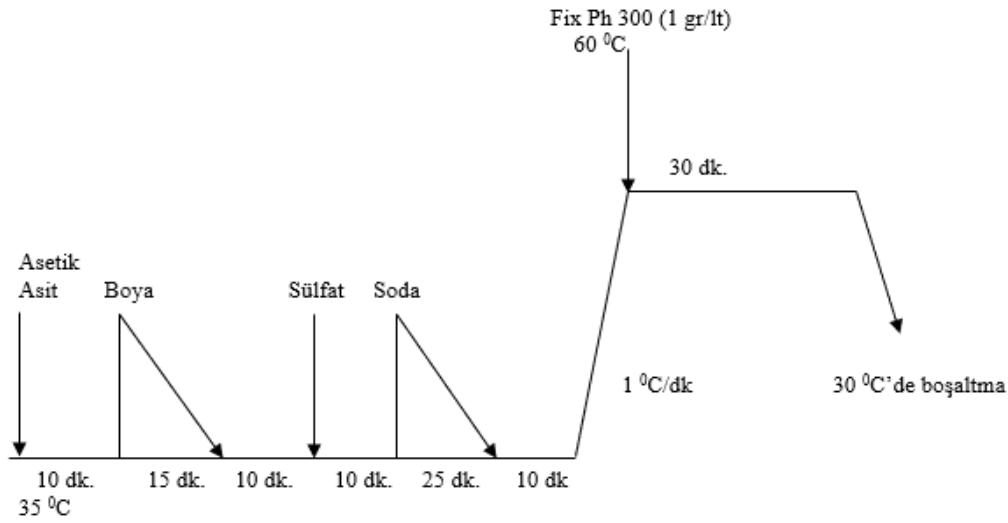
Renk	Boyarmadde	Boyarmadde %'si	Tuz (g/l)	Soda (g/l)
Lacivert	Levafix yellow CA	0,21	80	20
	Levafix red CA	1,64		
	Levafix blue CA	3		
Bej	Levafix yellow CA	0,114	18	6
	Levafix red CA	0,014		
	Levafix blue CA	0,041		

Şekil 2 ve Şekil 3'te boyama grafikleri verilmektedir.



Şekil 2. Lacivert Renk Boyama Grafiği

Boyamadan (lacivert) sonra yıkama ve son olarak apre işlemi yapılmıştır. Yıkama işlemi 5'er dakika içten dışa ve dıştan içe durulama ile başlamıştır. 1gr/lt asetik asit kullanılarak 50°C'de 5'er dakika içten dışa ve dıştan içe nötralizasyon yapılmıştır. 5'er dakika içten dışa ve dıştan içe olmak üzere 70 °C'de 10 dakika yıkama, 98 °C'de 10 dakika sabunlu yıkama, 98 °C'de 10 dakika sıcak yıkama, 50 °C'de 10 dakika yıkama yapılmıştır. İçten dışa 5 dakika durulama sonrası apre işlemine geçilmiştir. 0,5 gr/lt asetik asit, 2 gr/lt fiksator ve %2 yumuşatıcı kullanılarak 45 °C'de 20 dakika işlem yapılmıştır.



Şekil 3. Bej Renk Boyama Grafifi

Boyamadan (bej) sonra yıkama ve son olarak apre işlemi yapılmıştır. Yıkama işlemi içten dışa 5 dakika durulama ile başlamıştır. 5'er dakika içten dışa ve dıştan içe olmak üzere 70 °C'de 10 dakika yıkama, 98 °C'de 10 dakika sabunlu yıkama, 50 °C'de 10 dakika yıkama yapılmıştır. İçten dışa 5 dakika durulama sonrası apre işlemine geçilmiştir. 0,5 gr/lt asetik asit ve %2 yumuşatıcı kullanılarak 45 °C'de 20 dakika işlem yapılmıştır.

Bobinler boyandıktan sonra Thies basınçlı kurutma makinesi kullanılarak 110°C sıcaklığında kurutulmuştur. Boyalı ipliklerden (lacivert:40 tane bej:40 tane) 80 tane kumaş Gülas marka numune dokuma tezgahından elde edilmiştir. Kumaşların kopma mukavemetleri, yırtılma mukavemetleri ve renk farkı değerleri test edilmiştir. Mukavemet ve renk farkı ölçümlerinden önce tüm kumaşlar standart atmosfer koşullarında (20±2 °C ve % 65±2 nem) kondisyonlanmıştır. Kumaşların kopma ve yırtılma mukavemetleri Titan marka mukavemet test cihazında yapılmıştır. Kopma mukavemetleri TS EN ISO 13934-1 standardına ve yırtılma mukavemetleri TS EN ISO 13937-2 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen kumaş mukavemetlerinin istatistiksel olarak karşılaştırılmasında, parametrik testlerden bağımsız örneklem t testi yapılmıştır. Parametrik testlerin yapılabilmesi için verilerin normal dağılıma uyması ve varyansların homojen olması gerekmektedir. Bunun için normallik ve varyansların homojenliği testleri yapılmıştır. İstatistiksel testlerin yapılmasında SPSS programından yararlanılmıştır. Renk farkı ölçümleri CIELab formülüne göre 10° 'lik gözlem açısı kullanılarak D65 gün ışığı altında hesaplanmıştır (Duran, 2001). Çalışmada Datacolor marka, SF600PLUS model spektrofotometre kullanılmıştır.

BULGULAR

Kumaşların Kopma Mukavemeti Sonuçları

Kumaşların kopma mukavemetleri ölçülmüştür. Tablo 5'te ağartmalı standart reçete ve ağartmasız reçete ile boyanan ipliklerden elde edilen kumaşların kopma mukavemeti ortalama değerleri atkı ve çözgü yönünde olmak üzere verilmektedir. Pamuklu kumaşlarda kopma mukavemetinin atkı ve çözgü yönünde 25 kgf değerinden büyük olması gerekmektedir (Kutgi ve Ünal, 2019). Kumaşların hem ağartmalı hem ağartmasız işlem sonucunda, kopma mukavemetlerinde istenilen değerlere ulaştığı görülmüştür (Tablo 5).

Tablo 5. Kumaşların Ortalama Kopma Mukavemeti Değerleri (kgf)

Kopma mukavemeti	Lacivert		Bej	
	Ağartmalı	Ağartmasız	Ağartmalı	Ağartmasız
Çözgü Yönü	165,40	174,82	164,28	174,34
Atkı Yönü	125,25	129,14	125,67	128,95

Lacivert ve bej renk kumaşların çözgü ve atkı yönünde ölçülen kopma mukavemetleri incelendiğinde ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Kopma mukavemeti verilerindeki

değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını görebilmek için parametrik testlerden yararlanılmıştır. Bu testlerin uygulanabilmesi için verilerin normal dağılıma uyması ve varyansların homojen olması şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bunun için Shapiro-Wilk ve varyansların homojenliği testleri yapılmıştır (Tablo 6). Tablonun anlamlılık sütunundaki değerlerin 0,05'ten büyük olması verilerin normal dağıldığını ve varyanslarının homojen olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. Normallik Testi ve Varyansların Homojenliği Testi

Çözü yönünde				
Kopma	Grup	Shapiro-Wilk	df	Sig. (P)
Mukavemeti		Statistic		
	Ağartmalı	0,94	20	0,42
	Ağartmasız	0,96	20	0,36
Varyansların Homojenliği Testi				
Kopma		Levene Statistic	df	Sig. (P)
Mukavemeti		0,41	38	0,43
Atkı yönünde				
Kopma	Grup	Shapiro-Wilk	df	Sig. (P)
Mukavemeti		Statistic		
	Ağartmalı	0,98	20	0,51
	Ağartmasız	0,96	20	0,38
Varyansların Homojenliği Testi				
Kopma		Levene Statistic	df	Sig. (P)
Mukavemeti		0,38	38	0,35

Farklı boyama prosesi değerleri için kopma mukavemeti farklarının istatistiksel olarak anlamlılığının tespitinde t testi yapılmıştır. Tablo 7'de görüldüğü üzere analiz sonucunda boyama prosesi faktörünün seviyeleri arasındaki farkların anlamlı olduğu tespit edilmiştir ($P < 0,05$). Buna göre ağartma işlemi yapılmadan boyanan ipliklerden elde edilen kumaşlarda kopma mukavemeti artışı istatistiksel olarak anlamlıdır.

Tablo 7. t Testi

Çözü yönünde					
Grup	N	Ortalama	t	df	Sig.
Ağartmalı boyama	20	164,84	8,32	38	0,001
Ağartmasız boyama	20	174,58			
Atkı yönünde					
Grup	N	Ortalama	t	df	Sig.
Ağartmalı boyama	20	125,46	6,43	38	0,001
Ağartmasız boyama	20	129,045			

Kumaşların Yırılma Mukavemeti Sonuçları

Kumaşların yırtılma mukavemetleri ölçülmüştür. Tablo 8'de ağartmalı standart reçete ve ağartmasız reçete ile boyanan ipliklerden elde edilen kumaşların yırtılma mukavemeti ortalama değerleri atkı ve çözü yönünde olmak üzere verilmektedir. Pamuklu kumaşlarda yırtılma mukavemetinin atkı ve çözü yönünde 900 gf değerinden büyük olması istenmektedir (Kutgi ve Ünal, 2019). Kumaşların hem ağartmalı hem ağartmasız işlemde yırtılma mukavemetlerinin istenilen değerde olduğu görülmektedir (Tablo 8).

Tablo 8. Kumaşların Ortalama Yırtılma Mukavemeti Değerleri(kgf)

Yırtılma mukavemeti	Lacivert		Bej	
	Ağartmalı	Ağartmasız	Ağartmalı	Ağartmasız
Çözü Yönü	21,67	26,78	21,62	26,82
Atkı Yönü	15,46	16,14	15,45	16,16

Lacivert ve bej renk kumaşların çözü ve atkı yönünde ölçülen yırtılma mukavemetleri incelendiğinde ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Yırtılma mukavemeti verilerindeki değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını görebilmek için parametrik testlerden yararlanılmıştır. Bu testlerin uygulanabilmesi için verilerin normal dağılıma uyması ve varyansların homojen olması şartlarının

sağlaması gerekmektedir. Bunun için Shapiro-Wilk ve varyansların homojenliği testleri yapılmıştır (Tablo 9). Tablonun anlamlılık sütunundaki değerlerin 0,05'ten büyük olması verilerin normal dağıldığını ve varyanslarının homojen olduğunu göstermektedir.

Tablo 9. Normallik Testi ve Varyansların Homojenliği Testi

Çözü yönünde				
Yırtılma Mukavemeti	Grup	Shapiro-Wilk Statistic	df	Sig. (P)
	Ağartmalı	0,92	20	0,53
	Ağartmasız	0,96	20	0,38
Varyansların Homojenliği Testi				
Yırtılma Mukavemeti		Levene Statistic	df	Sig. (P)
		0,62	38	0,53
Atkı yönünde				
Yırtılma Mukavemeti	Grup	Shapiro-Wilk Statistic	df	Sig. (P)
	Ağartmalı	0,98	20	0,72
	Ağartmasız	0,95	20	0,48
Varyansların Homojenliği Testi				
Yırtılma Mukavemeti		Levene Statistic	df	Sig. (P)
		0,29	38	0,45

Farklı boyama prosesi değerleri için yırtılma mukavemeti farklarının istatistiksel olarak anlamlılığının tespitinde t testi yapılmıştır. Tablo 10'da görüldüğü üzere analiz sonucunda boyama prosesi faktörünün seviyeleri arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P < 0,05$). Buna göre ağartma işlemi yapılmadan boyanan ipliklerden elde edilen kumaşlarda yırtılma mukavemeti artışı istatistiksel olarak anlamlıdır.

Tablo 10. t Testi

Çözü yönünde					
Grup	N	Ortalama	t	df	Sig.
Ağartmalı boyama	20	21,64	3,12	38	0,001
Ağartmasız boyama	20	26,80			
Atkı yönünde					
Grup	N	Ortalama	t	df	Sig.
Ağartmalı boyama	20	15,45	2,23	38	0,001
Ağartmasız boyama	20	16,15			

Kumaşların Renk Farkı Değerleri Sonuçları

Deneylerde ağartma yapılan reçete ile boyanan numuneler referans alınarak ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşların renk farkı değeri ölçülmüştür. Bu değer tekstil işletmelerinde 1 değerine kadar, bilimsel çalışmalarda 0,5-0,6 değerine kadar kabul edilmektedir (Duran, 2001). Renk farkı lacivert renkte 1'in altında, bej renkte 1'in üstünde çıkmıştır. Bej renkte renk değerinin kullanıma uygun olmadığı görülmüştür. Elde edilen ΔE değerleri Tablo 11'de verilmektedir.

Tablo 11. Kumaşların Ortalama Renk Farkı Değerleri

Renk farkı	Lacivert	Bej
	Ağartmasız	Ağartmasız
	0,59	1,72

SONUÇ

Çalışmada ağartmalı ve ağartmasız iki farklı boyama prosesi ile bobin halinde iplikler iki farklı renkte boyanmıştır. Bu ipliklerden dokuma ile lacivert ve bej renkte kumaşlar üretilmiştir. Kumaşların kopma mukavemeti ve yırtılma mukavemeti ölçülerek ağartmalı ve ağartmasız boyama prosesi arasındaki fark istatistiksel olarak analiz

edilmiştir. Ayrıca ağartmasız boyama prosesi ile boyanan ipliklerden üretilen kumaşların renk farkı değerleri ağartmalı boyama prosesinden elde edilen aynı renkteki kumaş baz alınarak ölçülmüştür.

Renk farkı olmaksızın çözgü ve atkı yönünde ölçülen kopma mukavemetlerinin, ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. İstatistiksel analiz sonucunda ağartma işleminin kopma mukavemeti üzerine etkisinin anlamlı olduğu görülmüştür. Renk farkı olmaksızın çözgü ve atkı yönünde ölçülen yırtılma mukavemetleri, ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşlarda daha yüksek sonuçlara ulaşmıştır. Ağartma işlemi yapılmadan boyanan ipliklerden elde edilen kumaşların yırtılma mukavemeti artışının istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Buna göre ağartma işleminin kumaşların kopma ve yırtılma mukavemetlerini düşürdüğü söylenebilmektedir. Elde edilen kumaş numuneleri için bu değerlerin kabul edilebilir sınırlarda olduğu görülmüştür.

Ağartmalı standart reçete ile boyanan numuneler referans alınarak ağartma işlemi yapılmadan elde edilen kumaşların renk farkı değeri ölçülmüştür. Lacivert renkli kumaşlarda ölçülen renk farkı değerinin kabul edilebilir aralıkta olduğu görülmüştür. Bej renkli kumaşlarda ölçülen renk farkı değeri kabul edilebilir aralığın dışında çıkmıştır. Koyu renkli ipliği boyalı kumaşlarda ağartma işlemi yapılmadan istenilen renk elde edilmiştir.

Kumaş mukavemet değerleri ile renk farkı değerleri dikkate alındığında, koyu renklerde ağartmasız boyama yapılması üretim maliyetlerini düşürmekle birlikte çevreye olan olumsuz etkiyi de azaltacaktır. Böylece hem daha ekonomik hem de daha ekolojik bir üretim yapılmış olacaktır. Bu da sürdürülebilirliğe olan bakış açısının giderek geliştiği günümüz koşullarında daha yenilikçi üretim metotlarına katkı sağlayacaktır. Özellikle, açık renkli boyamalar için klasik ağartma yöntemlerine alternatif olarak istenilen rengin elde edildiği, ekonomik, ekolojik ve sürdürülebilir yöntemler hakkında çalışmalar hızlandırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Adıgüzel, M. (2011). *Uluslararası rekabet gücü, belirleyici faktörler ve ölçülmesi, Türkiye bağlamında bir değerlendirme*, Nobel Akademik Yayıncılık.
- Akyol, G., Yener, E., & Karakelle, S. B. (2022). Pamuklu kumaşların ön işlem prosesinde enzim kullanımı ile yeni ürün geliştirilmesi ve ürünün renklendirilmesi, *Tekstil ve Mühendis*, 29 (125), 17-27.
- Batur, G., & Kozbekçi Ayrancınar, S. (2021, June). Lazer teknolojisi: sürdürülebilir denim üretimine ekolojik çözüm. International Congress on Art and Design Research and Exhibition (pp.1038-1047).
- Benli, H., & Bahtiyari, M., İ. (2016). Pamuklu kumaşların ozon-hidrojen peroksit kombinasyonu ile ağartılması ve doğal boyalar ile renklendirilmesi, *Tekstil ve Mühendis*, 23(103), 189-196.
- Duran, K. (2001). *Tekstilde renk ölçümü ve reçete çıkarma*. Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma – Uygulama Merkezi Yayını.
- Eren, S., Eren, H.A., & Avıncı, O.O. (2018). Süperkritik karbondioksit akışkan ortamında (susuz) pamuğun hidrofilleştirilmesi ve ağartılması, Bursa Uludağ Üniversitesi TÜBİTAK Projesi.
- Eren, S., & Çeven, E., K. (2018). Pamuk ipliklerin bobin formunda ağartılmasında çevre dostu yöntem olarak ozon kullanım olanağının araştırılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23 (1), 17-30. <https://doi.org/10.17482/uumfd.376183>.
- Eren, H., A., Anış, P., Yılmaz D., Kirişçi, Ş., & İnkaya, T. (2009). Pamuğun ağartılmasında lakkaz, ozon ve hidrojen peroksitin kombine kullanımı, *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 4, 299-303.
- Erişmiş, B., & Eren, H., A. (2010). Tekstil terbiye işlemlerinde ultrason kullanımı. *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4(3), 30-38.
- Fettohov, R., Kaplan, V., Keskin, R., & Şimşek, G. (2005). Terbiye ve boyama amaçlı patronlar üzerine bir araştırma, *Tekstil Maraton Dergisi*, 15(80), 18-22.
- Gedik, G. (2020). Pamuk/Lyocell kumaşların titanyum (IV) oksit varlığında ultraviyole ışınlarıyla heterojen fotokataliz ile ağartılması ve ağartma işlemine oksijen radikali varlığının etkisinin incelenmesi, *Tekstil ve Mühendis*, 27(118), 64-74.

- Gündüz Şimşek, G., & Akarlan, F. (2018). Bobin boyamada hidrojen peroksit ile ağartma işleminin etkilerinin incelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (Özel), 437-447.
- Güngör, B., & Felekoğlu, B. (2018). Eko-verimlilik kavramı, gelişimi ve uygulanma süreci. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(3) Özel Sayı, 90-104. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.481167>.
- Gürsoy, N., Ç., & Hauser, P. (2010). Yeni katyonik ağartma aktivatörleri kullanılarak ağartılmış pamuklu örme kumaşların boyama özelliklerinin incelenmesi, *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 2, 155-161.
- Kaya, Ö., & Oduncu, A. (2016). Türk tekstil sektörünün uluslararası rekabet gücü değerlendirmesi, *Akademik Bakış Dergisi*, 54, 418-428.
- Kaya, Ö. (2013). *Türkiye'deki tekstil-konfeksiyon işletmelerinin (Kobi'lerinin) tedarik, üretim ve lojistik faaliyetlerinin ulusal rekabet üzerindeki etkileri*. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Eğitim Bilimleri Enstitüsü, Giyim Endüstrisi ve Moda Tasarımı Ana Bilim Dalı, Ankara 315s.
- Koçak, D., & Merdan, N. (2002). Sonokimya ve ultrasonik enerjinin tekstil sektöründe kullanımı, *Kimya Teknolojileri*, 17, 20-28.
- Kutgi, M., & Zervent Ünal, B. (2019). Kasarlı ve kasarsız terbiye prosesleri ile üretilmiş pamuklu kumaşların performanslarının karşılaştırılması, *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 6-10.
- Ledakowicz., S., J., Walawska., A., Filipowska., B., Lewartowska., J., Olczyk J., & Kiwała., M. (2015). New eco-friendly method of cellulosic product bleaching with simultaneous disinfection, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 23, 3 (111), 115-119. DOI: 10.5604/12303666.1152541.
- Mansuri., A., H., Khoddami., A., & Rezaei Do., A. (2011). Using ultraviolet radiation for the bleaching and pilling reduction of knitted cotton fabric, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 19, 3 (86), 74-77.
- Mıstık, S., İ. (2003). *Pamuklu materyallerin hidrojen peroksit ile ağartılmasında ultrasonik enerji yöntemi*. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 84s.
- Özbey, G., Yılmaz Şahinbaşkan, B., & Erdoğan E. (2019). Pamuklu kumaşın bentonit ile ağartma proses parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 18-20.
- Öztürk, Ç. (2018). *Tekstil sektöründe temiz üretim tebliği uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ 71s.
- Öztürk, D., & Eren, H. A. (2010). Tekstil terbiyesinde ozon kullanımı, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15 (2), 37-51.
- Polat, S. (2013). *Katyonik ağartma aktivatörü kullanarak hidrojen peroksit ağartmasının pamuklu örme kumaşlar için optimize edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 74s.
- Saka, Z. (2019). *Süperkritik karbondioksit akışkan ortamında (susuz) pamuğun hidrofilleştirilmesi ve ağartılması*. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa 259s.
- Soydaş, Ş. (2016). *Ozon teknolojisinin dokuma havlu kumaşlarda hidrofilit ve ağartma özelliğine etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli 129s.
- Tavcer, P., F. (2013). Effects of cellulase enzyme treatment on the properties of cotton terry fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 21, 6 (102), 100-106.
- TS EN ISO 13934-1, Tekstil- Kumaşların gerilme özellikleri bölüm 1: En büyük kuvvetin ve en büyük kuvvet altında boyca uzamanın tayini (şerit metodu)
- TS EN ISO 13937-2, Tekstil kumaşların yırtılma dayanımı bölüm 2: Pantolon şeklindeki deney parçalarının yırtılma dayanımı tayini (tek yırtma metodu)
- Yüksel, F. (2022). *Süperkritik karbondioksit akışkan ortamında beta siklodekstrin kullanılarak pamuğun hidrofilleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa 66s.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.05.2023
Kabul Tarihi : 09.11.2023

Received Date : 22.05.2023
Accepted Date : 09.11.2023

KATI YAĞLAYICI OLARAK GRAFİT KATKILI NAYLON 6 KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK PERFORMANSLARI

MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PERFORMANCE OF GRAPHITE FILLED NYLON-6 COMPOSITES AS SOLID LUBRICANT

Hüseyin ÜNAL^{1*} (ORCID: 0000-0003-0521-6647)
Salih Hakan YETGİN² (ORCID: 0000-0002-6068-9204)
Veysel Furkan ÜNAL³ (ORCID: 0000-0002-6639-0393)

¹ Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

² Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus/Mersin, Türkiye

³ Johannes Kepler University, Faculty of Engineering, Dept. of. Polymer Engineering, Linz, Austria

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hüseyin ÜNAL, unal@sakarya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada saf naylon 6 polimeri ile farklı oranlarda grafit (Gr) katkılı naylon 6 polimer esaslı kompozitlerin mekanik ve tribolojik performansları incelenmiştir. Ağırlıkça %5-10-15 gibi farklı oranlarda grafit katkılı kompozitler üretilmiştir. Granüller kompond üretim yöntemiyle üretilirken mekanik ve tribolojik test numuneleri enjeksiyonla kalıplama yöntemiyle basılmıştır. Üretilen kompozitlerin sertlik, çekme mukavemeti, kopmadaki % uzama ve elastiklik modülü gibi mekanik özellikleri ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranı gibi tribolojik özellikleri incelenmiştir. Tribolojik deneyler, 0,5 m/s kayma hızında ve 30 N yükte gerçekleştirilmiştir. Tribolojik özellikler naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerinin birbiri üzerinde çalışması durumunda gerçekleştirilmiştir. Çekmedeki elastiklik modülü ve sertlikte artışlar gözlenirken çekme mukavemeti, kopmadaki % uzama değerlerinde azalma tespit edilmiştir. En yüksek elastiklik modülü 4607 MPa ve en yüksek sertlik 77 Shore D değeri ile %15 oranında grafit katı yağlayıcı katkı içeren Naylon 6 polimer kompozitinde elde edilmiştir. En düşük çekme mukavemeti ve kopmadaki % uzama değerleri ile en düşük aşınma oranı ve en yüksek sürtünme katsayısı %15 grafit katkılı naylon 6 polimer kompozitinde elde edilmiştir. Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinin sürtünme katsayısı naylon 6/naylon 6 çiftine göre yaklaşık %63,8 oranında artmıştır. Nylon6/nylon6 ile karşılaştırıldığında, nylon6-5Gr/nylon6-5Gr kompozitin, nylon6-10Gr/nylon6-10Gr kompozitin ve Nylon6-15Gr/nylon6-15Gr kompozitin aşınma oranları sırasıyla %30,8, %51,7 ve %56,3 azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Naylon 6, grafit, tribolojik özellikler, mekanik özellikler, kompozit.

ABSTRACT

In this study, the mechanical and tribological performances of pure nylon 6 polymer and nylon 6 polymer-based composites filled with graphite at different ratios were investigated. Composites filled with graphite filler at different ratios of 5-10-15 wt% were produced. Granules were produced by compound production method, while mechanical and tribological test specimens were moulded by injection moulding method. The mechanical properties of the composites such as hardness, tensile strength, % elongation at break and modulus of elasticity and tribological properties such as coefficient of friction and wear rate were investigated. Tribological tests were carried out at a sliding speed of 0,5 m/s and a load of 30 N. Tribological properties were carried out in the case of nylon 6/nylon 6 pair, nylon 6-5Gr/ nylon 6-5Gr, nylon 6-10Gr/ nylon 6-10Gr and nylon 6-15Gr/ nylon 6-15Gr composite pairs working on each other. While increases in tensile modulus and hardness were observed, tensile strength and % elongation at break values decreased. The highest tensile modulus of 4607 MPa and the highest hardness of 77 Shore D were obtained in nylon 6 composite with 15wt.% graphite filler. The lowest tensile strength and % elongation at break values, the lowest wear rate and the highest coefficient of friction were obtained in nylon 6 polymer composite

ToCite: ÜNAL, H., YETGİN, S. H., & ÜNAL, V. F., (2023). KATI YAĞLAYICI OLARAK GRAFİT KATKILI NAYLON 6 KOMPOZİTLERİN MEKANİK VE TRİBOLOJİK PERFORMANSLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 853-865.

with 15% graphite filler. The friction coefficient of the nylon 6-15Gr/nylon 6-15Gr composite increased by approximately 63.8% compared to the nylon 6/nylon 6. Compared to Nylon6/nylon6, the wear rates of nylon6-5Gr/nylon6-5Gr composite, nylon6-10Gr/nylon6-10Gr composite and Nylon6-15Gr/nylon6-15Gr composite were reduced by 30.8%, 51.7% and 56.3%, respectively.

Keywords: Nylon 6, graphite, tribological properties, mechanical properties, composite.

GİRİŞ

Polimer malzemeler, son yıllarda farklı uygulamalarda metal malzemelere alternatif olarak giderek daha fazla kullanılmaya başlamıştır. Plastik parçalar, hafiflik, tasarım esnekliği, korozyon direnci ve yoğunluğa göre yüksek dayanım gibi özelliklerinden dolayı metalik malzemelere göre daha iyi avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, her bir uygulamada insanoğlunun isteklerini yerine getirmek için polimer malzemelerin uygun dolgu/katkı maddeleri ile karıştırılması gerekmektedir.

Su sayacı valfleri, yataklar, dişliler, burçlar ve silindirler gibi tribolojik uygulamalar için mekanik özellikler, viskoelastik özellikler, sıcaklık kararlılığı, ısı dağılımı, sürtünme katsayısı ve aşınma direnci gibi dikkate alınması gereken birkaç özellik mevcuttur. Polimer türü seçiminin yanında istenilen performansın elde edilmesi için uygun dolgu ve/veya katkı maddelerinin seçimi de çok önemlidir. Çoğu polimer malzemeler, yüksek yükler altında ve/veya yüksek kayma hızlarında yüksek aşınmaya maruz kalmakta ve bunun sonucu olarak yüksek sürtünme katsayısının oluşmasına da sebep olmaktadır. Yüksek yük ve kayma hızlarında, sürtünme katsayısı ve/veya aşınma büyük ölçüde artacak ve polimer malzeme bu koşullar altında kolaylıkla deforme olacaktır. Polimer malzemelerin tribolojik özellikleri, sürtünme katsayısı azaltılarak (sürtünme ısınmasının azaltılması) veya mukavemet değerleri (deformasyona karşı direnç) ile termal iletkenlik (yüzey sıcaklığının düşürülmesi) iyileştirilerek geliştirilebilmektedir. Grafit, molibden disülfid (MoS_2) ve politetrafloroetilen (PTFE) gibi bazı katı yağlayıcılar, mükemmel aşınma direnci ve düşük sürtünme özelliklerine sahiptir. Bu malzemeler, sıvı yağlayıcıların istenmediği ve etkisiz olduğu uygulamalarda tribolojik zorlukları çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ben Difallah, Kharrat, Dammak ve Monteil, 2012; Ben Difallah, Kharrat, Dammak ve Monteil, 2014; Kumar & Kanagaraj, 2016; Matyas, 2018; Alajmi, Alrashdan, Alsaed ve Shalwan, 2020). Bu malzemeler arasında, grafit, polimerlerin tribolojik, mekanik, termal ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan en önemli ve gelecek vaat eden katı yağlayıcılardan biridir (Raffaele, 2016; Dajana, Simon, Mitjan, Janez, Blaz ve Miroslav 2022; Ben Difallah et al., 2012). Karbonun üç formundan birisi olan grafit, her bir tabakasındaki hegzagonal birim hücrede düzenlenmiş atomların bulunduğu tabakalı bir yapıya sahiptir. Bu tabakalar, kayma şartları altında, kesme kuvveti uygulandığında kolaylıkla kırılabilen zayıf Van der Waals bağları ile bağlıdır (Zhou, Chiang, Xu, Du, Li, Xu ve Feiyu, 2012; Hussam, Andrey ve Victor, 2022; Ömer, Musa, ve Menderes, 2020).

Grafit katkılı polimer malzemelerin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan birisinde Piotr vd. (2019) yakıt hücrelerinde çift kutuplu levha olarak kullanıma uygunluğunu değerlendirmek için ağırlıkça %10-80 oranında grafit dolgu içeriklerine sahip polipropilen (PP) kompozitler üretmişlerdir. Elektrik özdirenci, termal iletkenlik ve mekanik özellikler belirlenmiş ve dolgu içeriğinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir. Grafit içeriği ile elektriksel ve termal iletkenlik artmıştır. Grafit ilavesi ile çekme ve eğilme dayanımları azalmıştır. Bununla birlikte, artan grafit içeriğiyle, her iki mukavemet değeri de değişmeden saf PP değerinin altında kalmıştır. Çekmedeki ve eğmedeki elastiklik modülleri artan grafit katkı içeriği ile doğrusal olarak artmıştır. Unal vd. (2013) farklı oranlarda (%5-10-15) grafit ilaveli PA6 kompozitlerin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Triboloji testleri paslanmaz çelik diske karşı 0,4 m/s kayma hızı ve 50-100 N yük altında yapılmıştır. Çekme dayanımı, kopma uzaması, darbe dayanımı ve spesifik aşınma oranı artan grafit miktarı ile azalmıştır. Elastiklik modülü, sertlik, dielektrik geçirgenliğin gerçek kısmı, dielektrik geçirgenliğin hayali kısmı ve dielektrik kaybı ise artan grafit miktarı ile artmıştır. Özelliklerdeki maksimum gelişme, ağırlıkça %5 ile %10 oranında grafit katkı maddesinin eklenmesinin ardından elde edildiği belirtilmiştir. Reddy (2015) %5-15 oranlarında grafit ve PTFE katkılı PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma testleri pim-disk sistemi ile çelik karşı diske karşı 0,5 m/s kayma hızı 100 N yük şartlarında yapılmıştır. Artan grafit miktarı ile çekme dayanımı artarken eğme ve darbe dayanımı azalmıştır. Grafit sürtünme katsayısını artırırken spesifik aşınma oranını azaltmıştır. Ben Difallah vd. (2012) sıcak presleme ile kalıplama tekniğiyle ürettikleri grafit tozu katkılı Akrilonitril-bütadien-stiren (ABS) kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Artan grafit miktarı ile mekanik özellikler azalmıştır. ABS polimerine grafit ilavesi ile

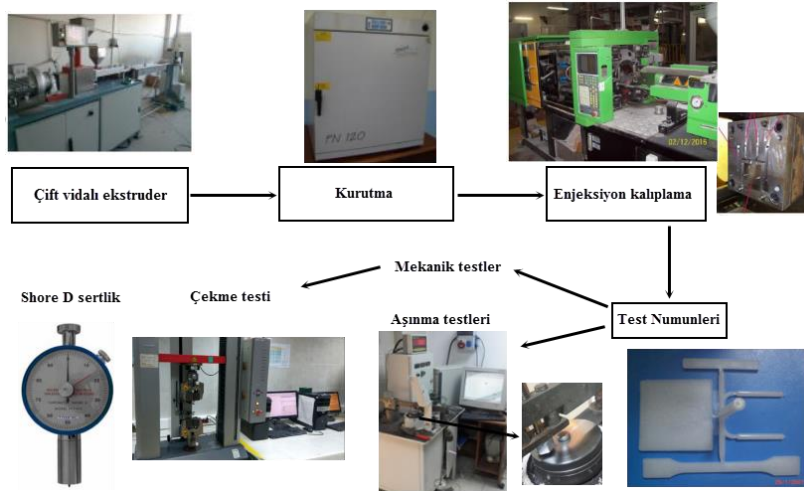
daha düşük sürtünme katsayısı ve artan grafit miktarı ile de azalan ağırlık kaybı elde edilmiştir. En iyi sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybı %7.5 grafit miktarında elde edilmiştir. Matyas (2018) %1,5, 2, 2,5, 3 ve 3,5 oranlarında grafit katkılı PA6 kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Artan grafit miktarı ile charpy çekme dayanımı ve darbe dayanımı azalmıştır. PA6 polimerine ilave edilen grafit ile sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığı belirtilmiştir. Yüksek grafit miktarlarında tribolojik özelliklerin kötüleştiği belirtilmiştir. Katiyar, Sujeet ve Arvind (2016) epoksi bazlı SU-8 polimer ile grafit katkılı (ağırlıkça %2-30) SU-8 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. %10 ve %20 oranında grafit içeriğinde elastiklik modülünün 2,2 kat arttığı belirtilmiştir. %10 grafit katkı oranında sürtünme katsayısı 2 kat azalmış aşınma ömrü ise 10 kat oranında artmıştır. %20 grafit katkılı kompozit numunede daha yüksek sürtünme katsayısı gözlenmiştir. Vikram, Bhaumik ve Pramanik (2023) ağırlıkça %1-3-5 oranlarında grafit katkılı %5 cam elyaf takviyeli PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Geliştirilen tüm kompozitler arasında, %1 oranındaki grafit katkılı PA6/5GF kompoziti, saf PA6'ya kıyasla tribolojik (0,20–0,26 COF) ve mekanik (45 MPa gerilme mukavemeti ve HRB 47 sertliği) özellikleri önemli ölçüde geliştirdiği belirtilmiştir. Kumar ve Kanagaraj (2016) farklı oranlarda grafit katkı içeren PA6 kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. %20 grafit içeriğinde en iyi mekanik özellikler elde edilmiştir. EN31 çelik diske karşı 1000-2000 rpm hız ve 5-30 N yük altında yaptıkları pim-disk aşınma testleri sonucunda %20 grafit miktarında en iyi tribolojik özellikler elde edilmiştir. Mohd-Abdul, Sathees, Nithin ve Shaik (2023) grafit katkılı naylon6 polimerinin tribolojik özelliklerini Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Raffaele (2016) ise grafit katkının polistiren (PS) polimeri üzerine etkisini araştırmıştır. Triboloji testleri için çelik ve PA66 bilyeler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, PS polimerinin sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve P.V (pressure*velocity/basınç*hız) limiti üzerinde grafit katkı oranının, katkı tipinin ve boyutunun önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Jitendra, Jayashree ve Raj (2019) kısa cam elyaf/Poliaril-eter-keton (PAEK) kompozitlere ilave ettikleri farklı oranlardaki grafit partiküllerinin (ağırlıkça %10, 15, 20 ve 25) fiziksel, mekanik, termal ve adeziv aşınma performansına etkilerini incelemişlerdir. Grafitin dahil edilmesi, mukavemet ve elastiklik modülünde bozulmaya ancak termal iletkenlikte artışa neden olmuştur. Kompozitler, 0,04 sürtünme katsayısı değeri ve $\sim 2 \times 10^{-16}$ m³/Nm özgül aşınma oranı (K_o) değeri ile çok düşük tribolojik özellikler göstermiştir. Ağırlıkça %15 oranında grafit içeren kompozit, en yüksek P.V limit değeri (154 MPa m/s) ve en düşük düşük sürtünme katsayısı (0,04) ve K_o (1,91x10⁻¹⁶ m³/Nm) göstererek önemli oranda tribolojik özellikleri geliştirmiştir. Gheisari ve Polycarpou (2019) %15Gr katkılı poliimit (PI) ve %10Gr ilaveli Politetrafloretillen (PTFE) polimerinin tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler takım çeliğine karşı 6,32 MPa temas basıncı ve 1,91 m/s kayma hızında yapılmıştır. Her iki polimerin de rulman uygulamaları için tribolojik açıdan uygun malzemeler olduğu ifade edilmiştir.

Literatürde grafit katkılı polimer kompozitlerin metal malzemeler ile temas ettiği durumlardaki aşınma ve sürtünme davranışları geniş bir şekilde araştırılırken birbiri ile temasta olan grafit+Naylon 6/grafit+Naylon 6 kompozit malzeme çiftlerinin aşınma davranışları üzerinde herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Endüstrinin birçok alanında polimer/polimer aşınma çifti ve/veya polimer kompozit/polimer kompozit aşınma çiftinin çalıştığı makine elemanlarına rastlanılmaktadır. Bu çalışmada, saf naylon 6 polimeri ile ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit katı yağlayıcı içeren naylon 6 polimer kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenirken tribolojik performansları da belirlenmiştir. Tribolojik özellikler naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/ naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/ naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerinin birbiri üzerinde çalışması durumunda gerçekleştirilmiştir. Naylon 6 polimer ana matrisi ile grafit katı yağlayıcı karışımı ikiz vidalı bir kompozit makinasında gerçekleştirilmiştir. Standartlara uygun mekanik ve aşınma test numuneleri ise enjeksiyonla kalıplama tekniği kullanılarak basılmıştır. Sonra ise sertlik ölçümleri, çekme testi ile aşınma ve sürtünme testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde malzemelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü, kopmadaki % uzama, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar grafit katkı oranına bağlı olarak düzenlenmiş ve grafiklerle karşılaştırmalı açıklanmıştır.

MALZEME VE METOT

Deneylerde kullanılan naylon 6 polimer ana matrisi Domamid ticari kodu ile Domopolymer firmasından satın alınmıştır. Grafit katı yağlayıcı katkı ise Odak İthalat ve İhracat Firmasından temin edilmiştir. Ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit katkı içeren naylon 6 kompozitler NR11-75 model ikiz vidalı ekstruderde granül formunda üretilerek polietilen torbalara doldurulmuştur. Üretim esnasında ekstruder ısıtıcı sıcaklıkları 220-250 °C sıcaklıklar arasında ayarlanmıştır. Enjeksiyonla kalıplama yapılmadan önce granüller nem ihtimaline karşı bir etüvde 80 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre ile kurutulmuştur. Mekanik ve tribolojik test numuneleri ise Erat marka bir enjeksiyon makinasında basılmıştır. Enjeksiyon ısıtıcı sıcaklıkları 220-250 °C sıcaklıklar aralığında ayarlanmış ve test numuneleri 150 bar enjeksiyon basıncında basılmıştır. Kalıp ısıtıcısı kullanarak test numunesi kalıbı sıcaklığı 80 °C olarak ayarlanmıştır. Test numuneleri basıldıktan sonra 23 °C oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında 24 saat süre

ile şartlandırılmıştır. Şekil 1’de naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren naylon 6 kompozitlerin üretim şeması verilmiştir.



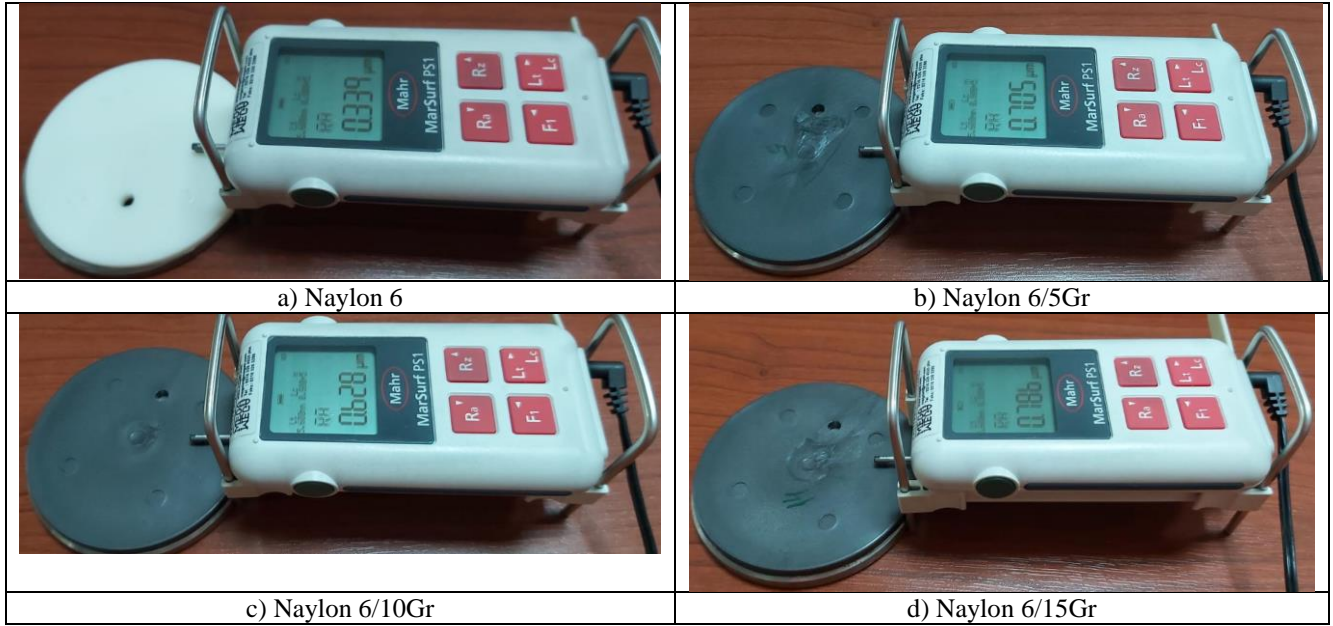
Şekil 1. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin üretim şeması

Saf naylon 6 polimeri ile ağırlıkça %5, 10 ve 15 oranında grafit içeren naylon 6 esaslı polimer kompozit test numunelerine sertlik ölçümleri yapılmış ayrıca çekme testi ile aşınma ve sürtünme testleri uygulanmıştır. Sertlik testleri ASTM D2240 standardına uygun olarak yapılmış sertlikler Shore D cinsinden ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde her bir test numunesi üzerinden en az 10 sertlik ölçümü yapılmıştır. Çekme testleri, ASTM D638 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Testler, Zwick marka Z020 model bir çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Her bir çekme test numunesi en az 5 ölçüm yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Çekme testleri 5 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Triboloji testleri pim-disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan pim ve diskler aynı malzemeler birbiri üzerinde çalışacak şekilde dizayn edilmiştir. Yani pim/disk çiftleri sırasıyla 4 ayrı grup olarak dizayn edilmiştir. 1) Naylon 6 pim/Naylon 6 disk çifti, 2) Naylon 6+5Gr pim/Naylon 6+5Gr disk çifti, 3) Naylon 6+10Gr pim/Naylon 6+10Gr disk çifti ve 4) Naylon 6+15Gr pim/Naylon 6+15Gr disk çifti olmak üzere planlama yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan pim malzemeler 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğundadır. Naylon 6 polimer ile grafit katkılı Naylon 6 kompozit diskler ise 5 mm kalınlığında ve 90 mm çapında olacak şekilde kullanılmıştır. Triboloji testleri ASTM G99 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Pim ve disk test numuneleri enjeksiyonla kalıplama tekniği ile üretilmişlerdir. Sürtünme ve aşınma testleri, kuru kayma şartları altında, yaklaşık oda sıcaklığında ve %50 nem şartlarında gerçekleştirilmiştir. Polimer ve kompozit disklerin yüzey pürüzlülükleri Mahr-MarSurfPS1 marka ve model cihaz kullanılarak ölçülmüş ve ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,339-0,786 Ra aralığında belirlenmiştir ve Şekil 2’de ölçüm sonuçları görsel olarak verilmiştir. Aşınma ve sürtünme testleri 30 N yük altında ve 0,5 m/s kayma hızında 1000 m kayma yolunda gerçekleştirilmiştir. Aşınma test parametreleri ve karşı disk malzemeler Tablo 1’de verilmiştir. Polimer/Polimer teması ile polimer kompozit/polimer kompozit temasında triboloji testlerinde malzeme çiftlerinin sürtünme katsayısı ve aşınma oranı değerleri tespit edilmiştir. Deneyler sırasında, sürtünme kuvveti yükleme koluna monte edilmiş bir yük hücresi ile ölçülmektedir. Deney süresi boyunca her 60 saniyede yaklaşık 1500 veri okunmuş ve bilgisayarda bir Excell programında kaydedilmiştir. Sürtünme kuvveti olarak ifade edilen yanıl yükler uygulanan normal yüke bölünerek malzeme çiftinin sürtünme katsayısı belirlenmiştir. Pim-disk teması esnasındaki sürtünme katsayısı eşitlik 1’de aşağıda verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Formülde μ : sürtünme katsayısını, F_s : sürtünme kuvvetini, F_n : normal kuvveti ifade etmektedir.

$$\mu = F_s / F_n \quad (1)$$

Aşınma oranının tespiti için ise pim numunelerin aşınma testi öncesi 0,0001 gr hassasiyetli Precia marka bir hassas terazide ağırlığı ölçülmüş (m_1), sonra deney sonrası aşınan pim numunesinin ağırlığı (m_2) ölçülmüştür. Deney öncesi ve sonrası ağırlık farkı $(m_1 - m_2) = \Delta m$ alınarak pim numunenin yoğunluğuna, kayma yoluna ve normal yüke bölünmesiyle eşitlik 2’de verilen formülle hesaplanmıştır. Formülde AO: aşınma oranı, ρ : pim numunenin yoğunluğu, L: kayma yolu, F_n : normal yükü temsil etmektedir.

$$AO = \Delta m / \rho * L * F_n \quad (2)$$



Şekil 2. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

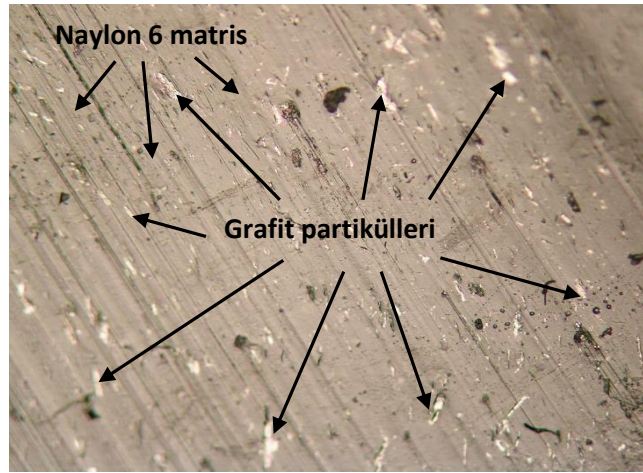
Tablo 1. Aşınma Test Parametreleri ve Kullanılan Karşı Disk Malzemeler

Pim	Karşı disk	Yük, N	Kayma hızı, m/s	Kayma mesafesi, m
Naylon 6	Naylon 6	30	0,5	1000
Naylon 6/5Gr	Naylon 6/5Gr			
Naylon 6/10Gr	Naylon 6/10Gr			
Naylon 6/15Gr	Naylon 6/15Gr			

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üretilen grafit katkılı naylon 6 esaslı kompozitlerin optik mikroskop incelemeleri yapılarak naylon 6 bünyesindeki grafit katkıların dağılımı araştırılmıştır. Kompozit üretimleri endüstriyel olarak çalışan çift vidalı ekstruderde gerçekleştirildiği için Naylon 6 bünyesine ilave edilen grafit katkıların homojen olarak dağıldığı düşünülmektedir. Ancak homojen dağılımı kanıtlamak adına Şekil 3'te %10 grafit katkılı naylon 6 kompozit malzemenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Tablo 2'de naylon 6 ve naylon 6 kompozitlerin çekme ve sertlik testleri sonuçları verilmiştir. Şekil 4'te ise grafit miktarının bir fonksiyonu olarak çekme dayanımı ve elastiklik modülü değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ve artan grafit katkı miktarı ile çekme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Saf Naylon 6 polimerinin 75 MPa olan çekme dayanımı, Naylon 6/5Gr, Naylon 6/10Gr ve Naylon 6/15Gr kompozitleri için sırasıyla 74 MPa, 69 MPa ve 67 MPa olarak elde edilmiştir. Saf Naylon 6 ile karşılaştırıldığında %5-15 oranında grafit miktarına bağlı olarak çekme dayanımında %1,35-11,9 oranında azalma meydana gelmiştir. Kompozit içerisindeki grafit partikülleri gerilme konsantrasyon bölgeleri olarak hareket etmekte ve üniform olmayan gerilme dağılımlarına yol açarak daha da yüksek gerilmeler oluşturmaktadır. Bu durum grafit partiküllerinin ayrılmasına ve boşluk oluşumuna sebep olmakta ve çatlak ilerlemesi nedeniyle kompozitler hızlı bir şekilde kırılarak çekme mukavemeti değerleri azalmaktadır (Diez-Pascual, Naffakh, Marco, Ellis ve Gomez-Fatou, 2012). Bununla birlikte Saf Naylon 6 polimerinin 3001 MPa olan elastiklik modülü %5 oranında grafit ilavesi ile %15,6 oranında artış ile 3472 MPa olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde %10 grafit ilavesi ile elastiklik modülü %13,1 oranında artmıştır. Saf Naylon 6 ile karşılaştırıldığında %15 grafit ilaveli Naylon 6 kompozitin elastiklik modülü %53,5 oranında artarak 4607 MPa olarak elde edilmiştir. Bu durum, nispeten daha yumuşak olan Naylon 6 polimerine grafit gibi oldukça sert bir malzeme ilave edildiğinde, kompozitlerin rijitlik değerlerinde iyileşmeye yol açtığı ile açıklanabilir (Jitendra et al., 2019). Naylon 6 polimeri yüksek plastisiteye sahip bir polimerdir. Grafit çok kırılgan bir malzemedir. İki farklı özellikteki bu malzemenin birleştirilmesi, saf polimerin orijinal özelliklerinden daha düşük plastisite ve daha yüksek rijitlik ve kırılganlık ile sonuçlanmasının ana nedenidir (Piotr vd., 2019). Reddy (2015) ise yüksek grafit içeriğinde mukavemet değerlerinin azalmasının sebebini, kompozit yapının oldukça gözenekli yapıda olmasına ve yüksek yüzey alanına bağlamışlardır. Taha ve Abdin (2011)

kompozitin rijitliğinin esas olarak dolgu maddesi-matris arayüzüne bağlı olmadığını, ancak çekme yönündeki dolgu içeriğine bağlı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Böylece kompozitlerin mukavemet değerleri azalmasına rağmen elastiklik modülü değerleri artmaya başlamıştır (Abenojar, Martinez, Velasco, Pascual-Sanchez ve Martin-Martinez, 2009). Yapılan bir başka yorumda ise polimere ilave edilen inorganik partiküllerin matriste iskelet görevi görerek fiziksel çapraz bağlanma nedeniyle zincir hareketliliği engellenerek kompozitin rijitliğinin artacağı belirtilmiştir. Kristal yapıdaki polimerlere ilave edilen inorganik katkıların çekirdeklenme (heterojen) oranını veya kristal yapıyı etkileyerek rijitliğin artmasına katkı sağlayacağı belirtilmiştir (Ji-Zhao, Qiang, Gary ve Chak-Yin, 2016). Vikram vd. (2023) %5cam elyaf katkılı PA6 kompozitlere ilave ettikleri grafit oranının fazlalaşması durumunda topaklaşma meydana geldiğini ve mekanik özelliklerin kötüleştiğini belirtmişlerdir. %3 ve %5 grafit ilavesinin elyaf ayrılması ve çatlak ilerlemesi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Grafit topaklaşmasının elyaflar arasında kaymaya neden olarak mukavemet değerlerinin azaldığı belirtilmiştir.

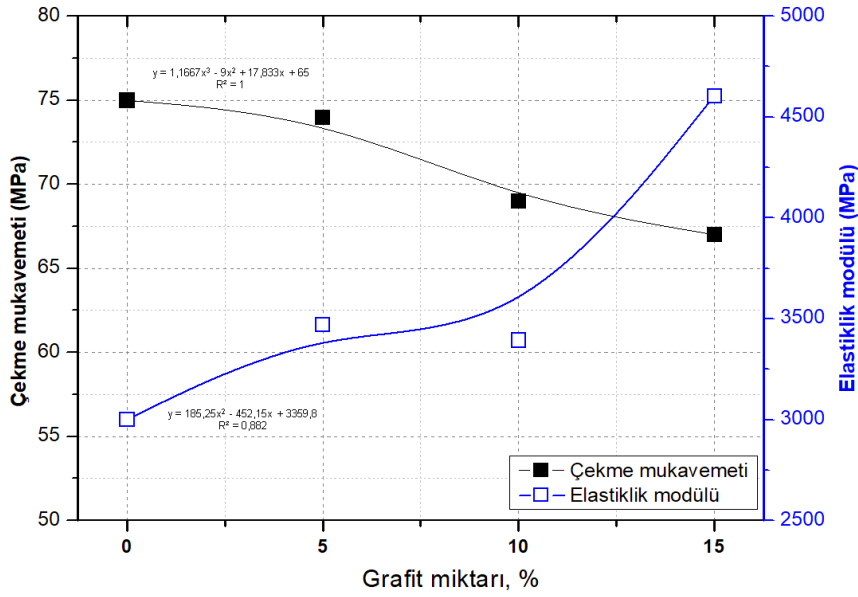


Şekil 3. Ağırlıkça %10 Oranında Grafit Katkılı Naylon 6 Kompozitin Optik Mikroskop Yüzey Görüntüsü

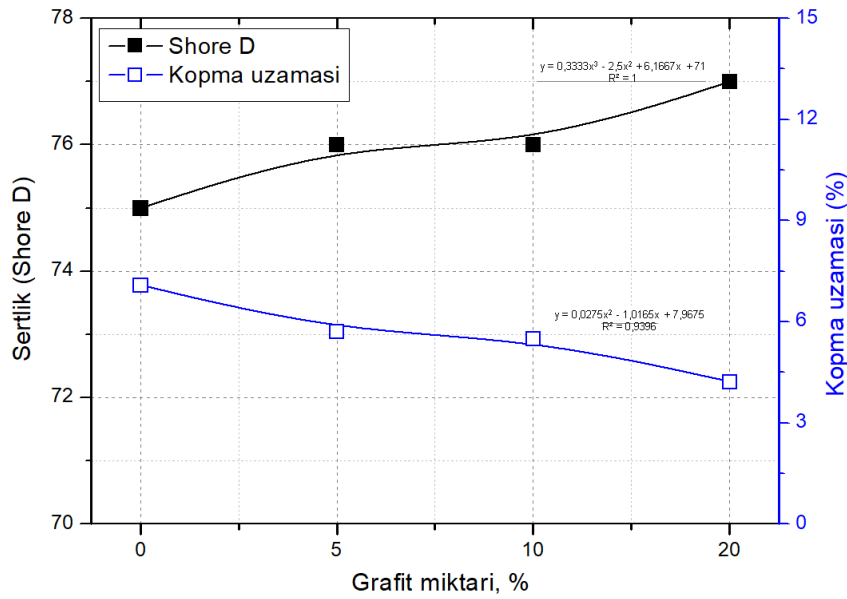
Tablo 2. Naylon 6 ve Naylon 6 kompozitlerin mekanik test sonuçları

Malzeme	Çekme mukavemeti,	Elastiklik modülü,	Kopma uzaması,	Sertlik, Shore D
	MPa	MPa		
Naylon 6	75	3001	7,09	75
Naylon 6/5Gr	74	3472	5,71	76
Naylon 6/10Gr	69	3395	5,5	76
Naylon 6/15Gr	67	4607	4,23	77

Şekil 5'te ise Saf Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kopmadaki % uzaması ve sertlik (Shore D) değerlerinin grafit katkı oranına göre değişimi verilmiştir. Beklenildiği gibi saf Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit katkısı ile kopmadaki uzama değerleri azalmıştır. Bu azalma grafit katkı oranına bağlı olarak değişmekle birlikte %15 grafit ilavesi ile kopma uzaması %67,6 oranında azalmıştır. Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ile deformasyona karşı direnç artmış ve kopma uzaması azalmıştır. Grafit partiküllerinin eklenmesi kristal yapıyı daha ince yapmakla birlikte yüksek grafit oranlarında heterojen bir karışım oluşabilmektedir. Bu durum, grafitin naylon moleküllerinin bağlanma kuvvetini azaltan naylon molekülleri arasında yer almasına ve topaklaşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak kompozitin özellikleri azalacaktır (Unal vd., 2013). Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit katkısının Shore D sertliğini hafif bir şekilde artırdığı ve Naylon 6 ve Naylon 6/Gr kompozitlerin Shore D sertlik değerlerinin 75-77 Shore D arasında olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarda (Sudheer, Prabhu, Raju ve Bhat, 2014) Naylon 6 ve grafit arasındaki arayüzey bağı zayıf olsa dahi grafit katkı nedeniyle yükün daha verimli bir şekilde aktarıldığı ve kompozitin sertliğinin arttığı belirtilmiştir. Vikram vd. (2003) ise düşük grafit içeriğinde, katkısız %5cam elyaf/PA6 kompozitine göre, homojen dağılım nedeniyle 45 Rockwell sertlik değerinden 47 Rockwell sertlik değerine ulaşıldığı belirtilmiştir.



Şekil 4. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin elastiklik Modülü ve Çekme Mukavemetinin Grafit Katkı Oranına Göre Değişimi



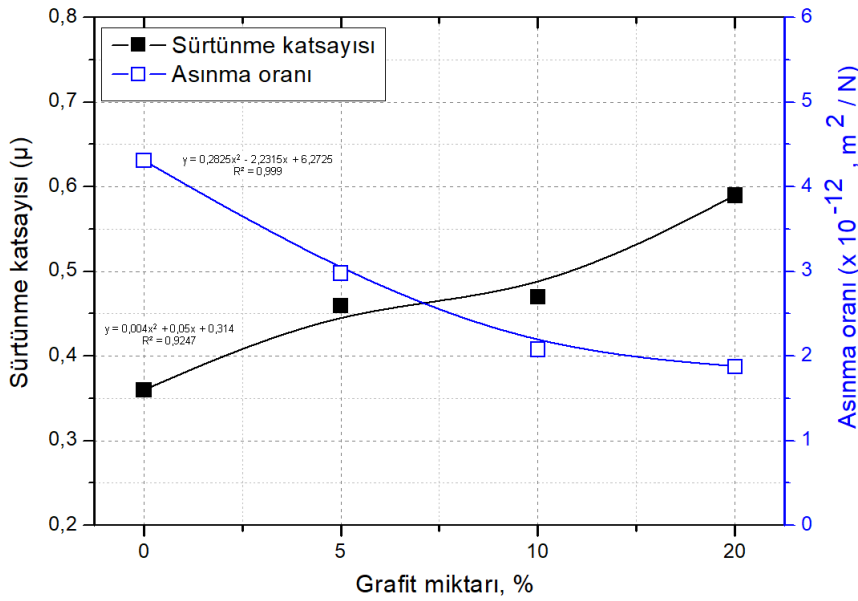
Şekil 5. Saf Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kopmadaki % Uzamanın ve Shore D Sertliğinin Grafit Katkı Oranına Göre Değişimi

Tablo 3'te aşınma deneyleri sonucu elde edilen spesifik aşınma oranı ve sürtünme katsayısı sonuçları verilmiştir. Şekil 6'da ise 30 N, 0,5 m/s kayma hızı ve 1000 m kayma yolu şartları altında Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kendi üzerlerinde çalışması durumundaki sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi verilmiştir. Saf Naylon 6 polimerinin 0,36 olan sürtünme katsayısı değeri %5 grafit ilavesi ile %27,7 oranında artmış ve 0,46 olarak elde edilmiştir. Naylon 6/10Gr kompozitin sürtünme katsayısı ise %30,5 oranında artarak 0,47 elde edilmiştir. Saf Naylon 6 polimerine ilave edilen %15 oranındaki grafit katkısı ise sürtünme katsayısını %63,8 oranında artırmış ve 0,59 değeri ile en yüksek sürtünme katsayısı elde edilmiştir. You, Li, Deng, Li ve Xie (2013) PA6/cam elyaf kompozitine ilave edilen grafit ile sürtünme katsayısının ve aşınmanın arttığını belirtmişlerdir. Polimerik sistemlerde sürtünme katsayısını doğrulayan denklem $\mu = kN^{n-1}$ 'dir. (Burada μ sürtünme katsayısıdır, N uygulanan yüküdür ve 'k' ve 'n' sabittir ve 'n' 2/3 arasındadır (Li, Yin, Jiang, Jin ve Cui, 2015). Yağlanmamış koşullar altında, temas alanındaki malzemenin deformasyonundan kaynaklanan sürtünme ısı, gerçek temas alanı ve polimer kompozitlerin kesme gerilmesinin bir ürünü olan adheziv sürtünmesinde bir artışa neden olmaktadır (Chen, Yan, Liu, Niu ve Ma, 2015). Daha yüksek yük ve kayma hızında sürtünme ısı artacaktır.

Böylelikle, gerçek temas alanının artması ile kesme gerilmesi azalarak sürtünme katsayısı artacaktır. Saf Naylon 6 polimerine ilave edilen grafit ve artan grafit katkı miktarı ile aşınma oranı önemli oranda azalmıştır. Saf Naylon 6 polimeri ile karşılaştırıldığında Naylon 6/5Gr, Naylon 6/10Gr ve Naylon 6/15Gr kompozitlerin aşınma oranları sırasıyla %44,6, %107,2 ve %129,2 oranlarında azalmıştır. Benzer sonuçlar Jitendra vd., (2019) ve Ben Difallah vd., (2012) tarafından da elde edilmiştir. Grafit, birbirine paralel altıgen halkalardan oluşan tabakalı yapıya sahip katı bir yağlayıcıdır. Sürtünme kuvvetleri, temas sırasında grafit partiküllerinin kayma doğrultusunda yönlendirilmesine sebep olmaktadır. Tabakalı yapı arasındaki zayıf bağlanma kayma doğrultusunda düşük kayma gerilmelerine kayma doğrultusuna dik yönde ise yüksek basma kuvveti sağlamaktadır (Suresha, Chandramohan, Renukappa ve Siddaramaiah, 2007; Reddy, 2015). Grafitin yüksek yük taşıma kapasitesi grafit katkılı Naylon 6 kompozitlerin kuru kayma şartları altında aşınma ömrünün artmasında etkili olmuştur.

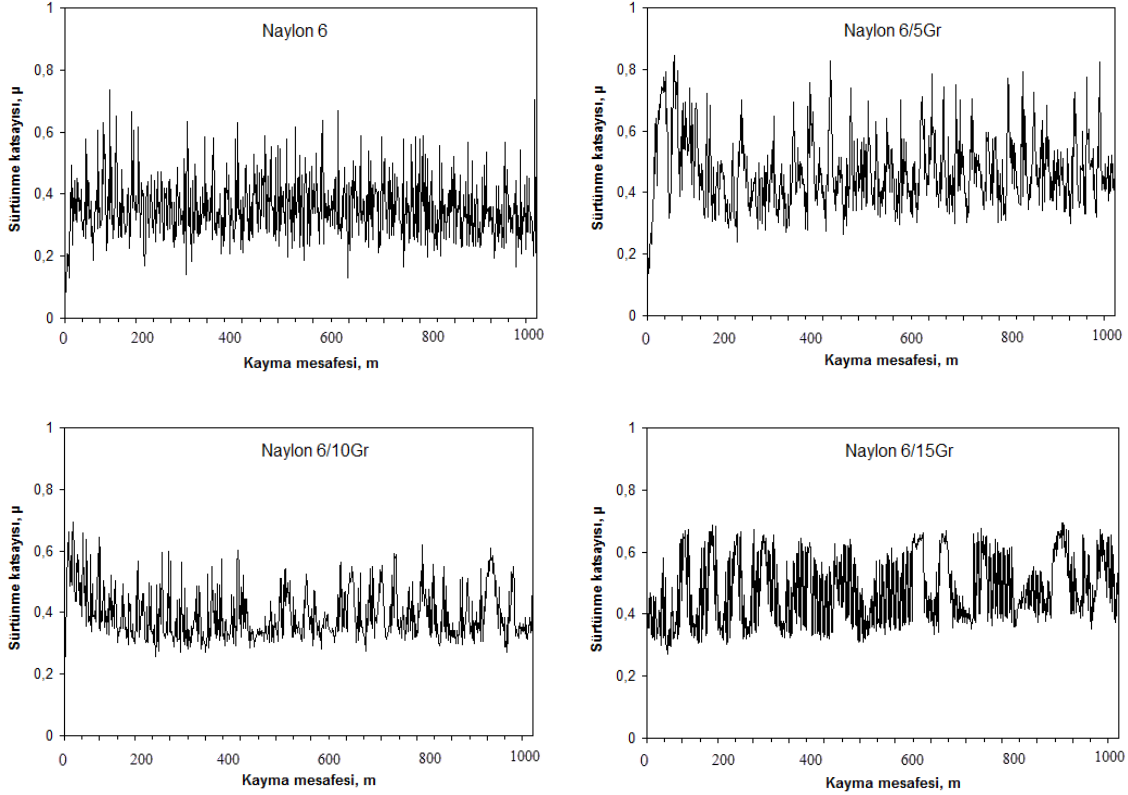
Tablo 3. Spesifik Aşınma Oranı ve Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Malzemeler	Yük (N)	Kayma hızı (m/s)	
		0.5	
		Spesifik aşınma oranı ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)	Sürtünme katsayısı, (μ)
Naylon 6	30	4,31	0,36
Naylon 6/5Gr		2,98	0,46
Naylon 6/10Gr		2,08	0,47
Naylon 6/15Gr		1,88	0,59

**Şekil 6. Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Sürtünme Katsayısı Ve Aşınma Oranının Değişimi (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)**

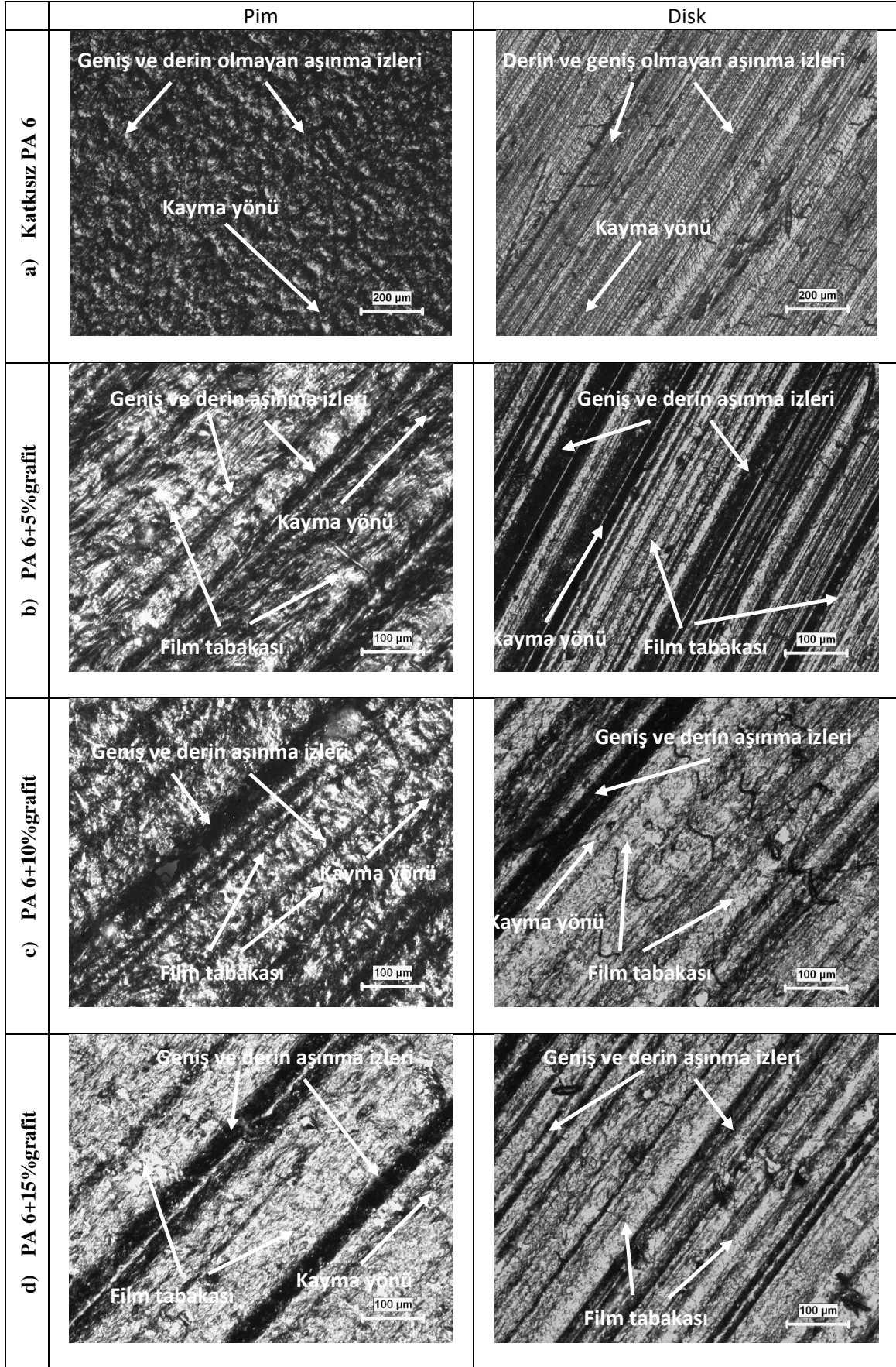
Şekil 7 a-d'de 0,5 m/s kayma hızı, 30 N yük ve 1000 m kayma mesafesi şartları altında Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 kompozitlerin kendi üzerlerinde çalışması durumundaki sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafikleri verilmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı, başlangıç aşaması (running-in-stage) ve kararlı hal aşaması (steady-state) olmak üzere iki aşamada meydana gelmiştir. Başlangıç aşamasında, kayma yüzeyleri arasındaki sürtünme etkileşimi makro düzeyde gerçekleşmiş ve sonrasında bu sürede plastik deformasyon ve aşınmanın sonucu olarak gerçek temas alanı artmıştır. Yeterli bir temas alanı sağlandıktan sonra, bireysel temasların gerçek alanındaki artış nedeniyle sürtünme yüzeylerinin etkileşimi mikro düzeyde devam etmiştir. Polimer matris ve dolgunun transferi sonucunda karşı disk yüzeyinde ince yağlayıcı film oluşmuştur. Başlangıç aşaması süresince, şiddetli aşınma oranı gözlenmiştir. Kararlı ve üniform yağlayıcı transfer filmi kararlı aşamaya sebep olmuştur. Bu aşamada, aşınma sonucu oluşan madde kaybı, minimum entropi üretimi ve dolayısıyla minimum aşınma ile yeni yüzey katmanlarının oluşumu ile telafi edilmiştir. Vikram vd. (2023) pimin dönen yüzeyi ile dönen diskin arasına sıkışan yerinden kopmuş aşınma (grafit) partikülleri nedeniyle sürtünme katsayısının

arttığını, sürtünme sırasında ise temas yüzeylerindeki sıcaklık değişimine bağlı olarak sürtünme katsayısının daha da arttığını belirtmişlerdir. Ancak, Ünal, Yetgin ve Köse (2023) vaks katkılı PA6 kompozitlerin pim ile disk arasındaki temas noktasında vaksın katı yağlayıcılık özelliğine sahip olmasından dolayı sıcaklığı azalttığı ve bunun sonucunda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının azaldığını belirtmişleridir. Şekillerden de görüldüğü gibi kararlı aşamaya geçmek için 200 m gibi bir mesafenin yeterli olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7. Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Sürtünme Katsayısı-Kayma Mesafesi Değişimi (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)

Şekil 8a-d'de Naylon 6 ve farklı oranlarda grafit içeren Naylon 6 esaslı kompozitlerin 30N yük altında 0,5 m/s kayma hızında kendi üzerlerinde çalışması durumundaki pim-disk optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 8a'da naylon 6/naylon 6 polimer çiftinin aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Polimer çifti birbiri üzerinde daha fazla aşınmakta ve daha düzgün yüzeyler oluşturmaktadır. Ancak naylon 6 bünyesindeki grafit oranı arttıkça (bakınız Şekil 8b-d) hem polimer pim hem de karşı disk yüzeylerinde derin ve geniş aşınma izleri gözlenmiştir. Ancak grafitin sağladığı yağlayıcılık sayesinde sürtünme katsayısı düşerken yüzeylerde oluşan ince film tabakası da aşınma oranının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 8. Naylon 6 ve Farklı Oranlarda Grafit İçeren Naylon 6 Kompozitlerin Kendi Üzerlerinde Çalışması Durumundaki Pim-Disk Optik Mikroskop Görüntüleri (Yük:30 N, Hız:0,5 m/s, Kayma yolu:1000 m)

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mekanik ve tribolojik çalışmalardan özetle aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

Saf naylon 6 polimerine göre farklı oranlarda (%5, %10 ve %15) grafit katı yağlayıcı içeren kompozitlerin elastiklik modülü sırasıyla %15,7, %13,1 ve %53,5 oranında artarken çekme mukavemeti değerleri ise sırasıyla %1,3, %8 ve %10,6 oranında azalmıştır.

Naylon 6/naylon 6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerine ve grafit oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı önemli oranda artmıştır. Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinin sürtünme katsayısı naylon 6/naylon 6 çiftine göre yaklaşık %63,8 oranında artmıştır.

Naylon6/naylon6 çifti, naylon 6-5Gr/naylon 6-5Gr, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr ve naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftlerine ve grafit katkı oranına bağlı olarak aşınma oranı değerlerinde önemli oranda azalma tespit edilmiştir. Naylon 6/naylon 6 çiftine göre naylon6-5Gr/naylon6-5Gr kompozit çiftinde aşınma oranı %30,8, naylon 6-10Gr/naylon 6-10Gr kompozit çiftinde aşınma oranı %51,7 ve Naylon 6-15Gr/naylon 6-15Gr kompozit çiftinde ise yaklaşık %56,3 oranında azalma tespit edilmiştir.

Özetle, grafit içeren naylon 6 kompozitlerin dişli sistemindeki parçalarda kullanımında katkısız naylon 6'ya alternatif olarak kullanılması önerilirken çalışma ömrü açısından ideal malzeme olarak ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abenojar, J., Martinez, M.A., Velasco, F., Pascual-Sanchez, V., & Martin-Martinez, J.M. (2009). Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin. *The Journal of Adhesion*, 85(4-5), 216–238. <https://doi.org/10.1080/00218460902881782>
- Alajmi, M., Alrashdan, K.R., Alsaed, T., & Shalwan, A. (2020). Tribological characteristics of graphite epoxy composites using adhesive wear experiments. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13671–13681. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.106>
- Ben Difallah, B., Kharrat, M., Dammak, M., & Monteil, G. (2014). Improvement in the tribological performance of polycarbonate via the incorporation of molybdenum di-sulfide particles. *Tribology Transactions*, 57(5), 806-813. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.913751>
- Ben Difallah, B., Kharrat, M., Dammak, M., & Monteil, G. (2012). Mechanical and tribological response of ABS polymer matrix filled with graphite powder. *Materials and Design*, 34, 782–787. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.001>
- Chen, Z., Yan, H., Liu, T., Niu, S., & Ma, J. (2015). Improved mechanical and tribological properties of bismaleimide composites by surface-functionalized reduced graphene oxide and MoS₂ coated with cyclo-triphosphazene polymer. *RSC Advances*, 5, 97883–97890. <https://doi.org/10.1039/C5RA19101G>
- Dajana, J., Simon, K., Mitjan, K., Janez, S., Blaz, N., & Miroslav, H. (2022). Effect of expanded graphite on mechanical and tribological properties of Polyamide 6/Glass fibre composites. *Advances in Polymer Technology*, 9974889. <https://doi.org/10.1155/2022/9974889>
- Diez-Pascual, A.M., Naffakh, M., Marco, C., Ellis, G., & Gomez-Fatou, M.A. (2012). High performance nanocomposites based on poly-ether-ketones. *Progress in Materials Science*, 57(7), 1106-1190. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.03.003>
- Gheisari, R., & Polycarpou, A.A. (2019). Tribological performance of graphite-filled polyimide and PTFE composites in oil-lubricated three-body abrasive conditions. *Wear*, 436–437, 203044. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203044>
- Hussam, M., Andrey, A.S., & Victor, V.T. (2022). Effect of graphite filler type on the thermal conductivity and mechanical behavior of Polysulfone-based composites. *Polymers (Basel)*, 14(3), 399. <https://doi.org/10.3390/polym14030399>
- Jitendra, N.P., Jayashree, B., & Raj, K.P. (2019). Optimization of graphite contents in PAEK composites for best combination of performance properties. *Composites Part B*, 174, 106951. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106951>

- Ji-Zhao, L., Qiang, D., Gary C.P.T., & Chak-Yin, T. (2016). Tensile properties of graphene nano-platelets reinforced polypropylene composites. *Composites Part B*, 95, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.011>
- Katiyar, J.K., Sujeet, K.S., & Arvind K. (2016). Effect of Graphite Concentration on the Tribological and Mechanical Properties of Filled SU-8 Polymer. *Tribology Online*, 11(2), 152-158. <https://doi.org/10.2474/trol.11.152>
- Kumar, S.S., & Kanagaraj, G. (2016). Investigation on mechanical and tribological behaviours of PA6 and graphite-reinforced PA6 polymer composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 4347-4357. <https://doi.org/10.1007/s13369-016-2126-2>
- Li, H., Yin, Z., Jiang, D., Jin, L., & Cui, Y. (2015). A study of the tribological behaviour of transfer films of PTFE composites formed under different loads, speeds and morphologies of the counterface. *Wear*, 328-329, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.028>
- Matyas, A. (2018). Influence of graphite additives on mechanical, tribological, fire resistance and electrical properties in polyamide 6. *Technical Gazette*, 25(4), 1014-1019. <https://doi.org/10.17559/TV-20160702212234>
- Mohd. Abdul, R., Sathees K.S., Ch. Nithin, C., & Shaik, S. (2023) Investigation on tribological behaviour of graphite reinforced Nylon 6 polymer composites evaluated by Taguchi method. *AIP Conference Proceedings*, 2548 (1), 030006. <https://doi.org/10.1063/5.0137683>.
- Ömer, Ş., Musa, Ş., & Menderes, K. (2020). Sürdürülebilir üretim için grafit takviyeli Polipropilen kompozit ürünlerin bazı termal ve mekanik özelliklerinin deneysel analizi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 10-20. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.687111>.
- Piotr, R., Beate, K., & Petra, P. (2019). Characterization of highly filled PP/Graphite composites for adhesive joining in fuel cell applications. *Polymers (Basel)*, 11(3), 462. <https://doi.org/10.3390/polym11030462>
- Raffaele, G. (2016). Tribology of graphite-filled Polystyrene. *Lubricants*, 4(2), 20. <https://doi.org/10.3390/lubricants4020020>
- Reddy, A.C. (2015). Characterization of mechanical and tribological behaviour of (Nylon 6 + Graphite + Teflon) nano particulate composite: Application perspective. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4), 378-386.
- Sudheer, M., Prabhu, R., Raju, K., & Bhat, T. (2014). Effect of filler content on the performance of epoxy/PTW composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 970468. <https://doi.org/10.1155/2014/970468>
- Suresha, B., Chandramohan, G., Renukappa, N.M., & Siddaramaiah, H. (2007). Mechanical and tribological Properties of glass-epoxy composites with and without graphite particulate filler. *Journal of Applied Polymer Science*, 103, 2472-2480. <https://doi.org/10.1002/app.25413>
- Taha, I., & Abdin, Y.F. (2011). Modeling of strength and stiffness of short randomly oriented glass fiber-polypropylene composites. *Journal of Composite Materials*, 45, 1805-1821. <https://doi.org/10.1177/0021998310389089>
- Unal, H., Kadir E., & Abdullah, M. (2013). Mechanical, electrical and tribological properties of graphite filled polyamide-6 composite materials. *Journal of Polymer Engineering*, 33(4), 351-355. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2013-0043>
- Ünal, H., Yetgin, S.H., & Köse, S. (2023). Tribological performance of polyamide 6/wax blend for rolling bearing, bushing and gear applications. *International Journal of Chemistry and Technology*, 7 (1), 77-83. <https://dx.doi.org/10.32571/ijct.1292871>
- (URL-1) <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Differential-nylon-plastic-helical-toothed-gear-60494696137.html>, 20.05.2023.
- (URL-2) <https://turkish.alibaba.com/product-detail/Customized-nylon-gear-parts-for-mechanical-1600178405207.html>, 20.05.2023.
- Vikram, K., Bhaumik, S., & Pramanik, S. (2023). Effect of graphite on tribological and mechanical properties of PA6/5GF composites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 3341-3355. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11939-8>

You, Y.L., Li, D. X., Deng, X., Li, W. J., & Xie, Y. (2013). Effect of solid lubricants on tribological behaviour of glass fiber reinforced polyamide 6. *Polymer Composites*, 34(11), 1783–1793. <https://doi.org/10.1002/pc.22582>

Zhou, S., Chiang, S., Xu, J., Du, H., Li, B., Xu, C., & Feiyu, K. (2012). Modeling the in-plane thermal conductivity of a graphite/polymer composite sheet with a very high content of natural flake graphite. *Carbon*, 50(14), 5052–5061. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.045>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.05.2023
Kabul Tarihi : 25.09.2023

Received Date : 26.05.2023
Accepted Date : 25.09.2023

SENTINEL-2 MSI VE LANDSAT-9 OLI UYDU GÖRÜNTÜLERİYLE YANMIŞ ALANLARIN TESPİTİ: 2022 MUĞLA/MARMARİS ORMAN YANGINI

DETECTION OF BURNED AREAS WITH SENTINEL-2 MSI AND LANDSAT-9 OLI SATELLITE IMAGES: 2022 MUĞLA/MARMARİS FOREST FIRE

Emre YÜCER¹ (ORCID:0000-0003-0417-9338)

¹ Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Emre YÜCER, emreyucer@karabuk.edu.tr

ÖZET

Orman yangınları canlılara ve bitki örtüsüne zarar vermekte, bunun yanında hava kirliliğine de neden olmaktadır. Bu nedenle orman yangınlarıyla mücadele önemli bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde görüntü işleme algoritmaları ve uzaktan algılamadaki farklı indeksler kullanılarak uydu görüntülerinden yanan alanların tespiti yapılabilmektedir. Bu çalışmada 21 Haziran 2022 tarihinde Muğla ili Marmaris ilçesinin Küfre koyu ve Hisarönü mahallesinde meydana gelen orman yangını Sentinel-2 MSI ve Landsat-9 OLI uydu görüntüleriyle analiz edilmiştir. Bu amaçla çalışma alanına ait yangın öncesi ve sonrasında ait uydu verilerinden Normalleştirilmiş Fark Bitki İndeksi (Normalized Difference Vegetation Index-NDVI), Normalize Edilmiş Nem İndeksi (Normalized Moisture Index-NDMI), Normalize Edilmiş Yanma Oranı İndeksi (Normalized Burn Ratio Index-NBRI) ve Yanmış Alan İndeksi (Burned Area Index-BAI) hesaplanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen yanmış alanlar Orman Genel Müdürlüğü (OGM) verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda OGM değerlerine en yakın sonuçların; Landsat-9 OLI görüntüsünde NDMI ve Sentinel-2 MSI görüntüsünde NDVI indekslerinin olduğu tespit edilmiştir. Sınıflandırma sonuçlarını değerlendirmek için hata matrisi hesaplanmıştır. Genel doğruluk ve Kappa değerlerine göre Sentinel-2 MSI görüntüsü, Landsat-9 OLI görüntüsüne göre daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Sentinel-2 MSI görüntüsünde 0,99 genel doğruluk ve 0,98 Kappa değeri ile NBRI indeksi en yüksek değerleri elde etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Landsat-9 OLI, orman yangını, Sentinel-2 MSI, uzaktan algılama indeksleri

ABSTRACT

Forest fires damage living creatures and vegetation, as well as cause air pollution. Therefore, the fight against forest fires is an important issue. Today, thanks to the developing technology, it is possible to detect the burned areas by using image processing algorithms, indexes used in remote sensing and satellite images. In this study, the forest fire that occurred on June 21, 2022 in Muğla province, Marmaris district, Küfre bay and Hisarönü neighborhood was analyzed with Sentinel-2 MSI and Landsat-9 OLI satellite images. For this purpose, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Moisture Index (NDMI), Normalized Burn Ratio Index (NBRI) and Burned Area Index (BAI) were calculated from the satellite data before and after the fire. As a result of the analysis, the burned areas were compared with the data of the General Directorate of Forestry. As a result of this comparison, it was determined that the closest results to the General Directorate of Forestry values were NDMI in the Landsat-9 OLI image and NDVI indices in the Sentinel-2 MSI image. The error matrix was calculated to evaluate the classification results. According to general accuracy and Kappa values, Sentinel-2 MSI image has higher values than Landsat-9 OLI image. The NBRI index obtained the highest values with 0,99 overall accuracy and 0,98 Kappa value in Sentinel-2 MSI image.

Keywords: Landsat-9 OLI, forest fire, Sentinel-2 MSI, remote sensing indices

ToCite: YÜCER, E., (2023). SENTINEL-2 MSI VE LANDSAT-9 OLI UYDU GÖRÜNTÜLERİYLE YANMIŞ ALANLARIN TESPİTİ: 2022 MUĞLA/MARMARİS ORMAN YANGINI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 866-880.

GİRİŞ

Orman yangınları doğal çevreye ve ekosisteme zarar veren en önemli afetlerdendir. Küresel ısınmayla birlikte meydana gelen iklim değişiklikleri orman yangınlarının sayısında artırmıştır. Son yıllarda, Avustralya'dan Kuzey Kutbu'na, Kuzey ve Güney Amerika'ya kadar dünya çapında rekor kıran orman yangını sezonları görülmektedir. Küresel sıcaklıkların artmasıyla, orman yangını riskini azaltma ihtiyacı ve bunun yanında yangınların tespiti her zamankinden daha kritik bir seviyede olmaktadır. Pek çok farklı iklim tipinde orman yangınları görülmekle birlikte orta kuşak iklimlerinde orman yangınları daha sık gözlemlenmektedir (Chung vd. 2019; Gonçalves & Sousa 2017). UNEP (United Nations Environment Programme-Birleşmiş Milletler Çevre Programı) hükümetlere artan orman yangınlarına karşı yaklaşımlarını yeniden düşünmeleri için acil bir çağrı yapmaktadır. Yeni bir "Yangına Hazır Formül" çağrısında bulunarak ve ekosistemin restorasyonunun önemini vurgulayarak, daha hazırlıklı olmak ve sonrasında yanmış alanların en iyi şekilde yeniden kazandırılarak orman yangını riskini en aza indirilebileceğini belirtmektedir (UNEP, 2023).

Ormanlar canlıların temel ihtiyacı olan oksijenin üretilmesinde, ekosistemin devamlılığı ve su kaynaklarının dengesinin sağlanmasında önemli rol almaktadır. Bu nedenle yeryüzünün yaşanabilir olması ve bunun devam ettirilmesi orman varlığının devamına bağlıdır. Kontrol edilemeyen ve aşırı orman yangınları insanlar, biyolojik çeşitlilik ve ekosistemler için yıkıcı olabilir. Ayrıca iklim değişikliğini şiddetlendirerek atmosfere önemli miktarda sera gazı salınmasına neden olur. Akdeniz bölgesinde bulunan ormanlar bitki örtüsü ve çeşitlilik açısından kuzey yarım kürede bulunan diğer ormanlara göre daha zengin yapıya sahiptir. Bunun yanında Akdeniz'deki ormanlar erozyon, su verimliliği ve şehir alanlarındaki mikroklima etkileri gibi pek çok faktörün üzerinde önemli etkilere sahiptir (Ertuğrul, 2005, Sarp vd. 2018).

Türkiye'de Akdeniz ikliminin yaygın olarak görüldüğü Ege ve Akdeniz bölgelerinde orman yangınlarının sayısı oldukça fazladır. Bunun sebebi Akdeniz ikliminde yarı nemli-kuru iklim şartlarının görülmesidir. Türkiye'de 2022 yılı içerisinde toplam 2160 orman yangını meydana gelmiştir. Bu yangınlarda toplam 12 799 hektar orman alanı zarar görmüştür. Toplam orman yangınları içerisinde en fazla orman yangının olduğu bölge müdürlükleri, 293 yangınla İzmir ve 273 yangınla Muğla bölge müdürlükleridir (OGM, 2023).

Orman yangınlarının tespit edilmesi, izlenmesi ve yangın sonrasındaki hasarlı alanların iyileştirilmesi doğal çevrenin korunması için önemlidir. Uzaktan algılama platformlarından elde edilen veriler orman yangınlarından zarar görmüş alanların yüksek doğrulukta ve hızlı bir şekilde tespit edilmesine olanak sağlamaktadır. 1980'li yıllardan itibaren orman yangınlarının hem global hem de bölgesel ölçekte, doğal çevrede meydana getirdiği değişikliklerin ortaya çıkarılması için pek çok uzaktan algılama teknikleri ve indeksleri geliştirilmiştir. Orman yangınları sonucunda bitki örtüsündeki ve arazi yüzeyindeki değişimler uydulardaki sensörler tarafından ölçülen spektral farklılıkların incelenmesine ve bunun sonucunda da farklı spektral indekslerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. NBRI, NDVI, BAI ve NDMI uydu verileri kullanılarak yanmış alanları ortaya çıkarmak için kullanılan indekslerin başında gelmektedir (Sarp vd. 2018; Navarro vd. 2017; Chen vd. 2015).

Navarro vd. (2017), Sentinel-2A uydu verilerinden yararlanarak 2016 yılında, Portekiz'in Maderia adasında meydana gelen yangını incelemişlerdir. Yanmış alanların tespit edilmesinde NDVI ve Yeşil Normalize Fark Bitki İndekslerinden (GNDVI- Green Normalized Difference Vegetation) ve NBRI indekslerinden yararlanmışlardır. Yangın öncesi ve yangın sonrasına ait görüntülerden fark görüntüleri elde edilerek yanmış alanlar ortaya çıkarılmıştır.

Çolak ve Sunar (2018), Landsat-8 OLI ve Sentinel-2 MSI uydu verilerini kullanarak 2017 yılında İzmir'de meydana gelen yangını incelemişlerdir. Yanmış alanların ortaya çıkarılmasında BAI, Termal Normalleştirilmiş Yanma Oranı İndeksi (NBRT- Normalized Burn Ratio Thermal) ve Orta Kızılötesi Yanmış Alan İndeksi (MIRBI- Mid-infrared Burn Index) kullanmışlardır. Bunların yanında eğitilmiş ve eğitimsiz sınıflandırma yöntemlerini de uygulamışlardır. Elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında, Sentinel-2 MSI verilerinden elde edilen sonuçların doğruluklarının daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Quintano vd. (2018), 2015 yılında İspanyada meydana gelen orman yangının incelenmesinde Sentinel-2 MSI ve Landsat-8 OLI uydu verilerini kullanmışlardır. Yanmış alanların tespit edilmesinde NBRI indeksinden yararlanmışlardır. Yangın öncesi ve sonrasında ait NBRI indeksinden fark alınmıştır. Fark görüntülerinden Botella-Martínez ve Fernández-Manso (2017), çalışmasında kullandıkları eşik belirleme yöntemine göre fark

görüntülerinden yanmış alanlar belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, kullanılan indeksin yanan alanların haritalandırılması ve hasar boyutunun ortaya çıkarılmasında yeterli doğrulukta olduğu tespit edilmiştir.

Sarp vd. (2018), 2017 yılı Temmuz ayında Mersin ilinin Anamur ilçesinde meydana gelen yangını çalışmalarında incelemişlerdir. Yapılan çalışmada Landsat 8 OLI-TIRS uydu görüntüleri kullanılarak yangın öncesi ve yangın sonrası durum karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırılmada NBRI, Toprak Ayarlı Bitki Örtüsü İndeksi (SAVI-Soil Adjusted Vegetation Index), NDMI ve Yer Yüzey Sıcaklığı (LST- Land Surface Temperature) indeksleri kullanılmıştır. Yangın öncesi ve yangın sonrası NBRI, NDMI ve SAVI indekslerinin sonuçlarının kendi içerisinde farklılıkların olduğunu tespit etmişlerdir.

Chung vd. (2019), 2019 yılından Güney Kore'nin Gangwon eyaletinden meydana gelen yangın sonucunda ortaya çıkan hasarı belirlemek için Sentinel-2 MSI verileri kullanmışlardır. Çok zamanlı görüntü analizi, yaygın olarak kullanılan iki spektral indeks olan NDVI ve NBRI ile hem nesne hem de piksel tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Yangından etkilenen bölgeleri doğal olarak değişen alandan ayırmak için 2018'in aynı dönemine ait ek görüntü çifti kullanılmış ve 2019'dan yalnızca bir çift görüntü kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. İki indeksin karşılaştırılmasında NDVI sonuçlarının doğruluk değerlerinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

García-Llamas vd. (2019), İspanya'da 2017 yılında meydana gelen orman yangınını inceledikleri çalışmalarında Landsat-8 OLI ve Sentinel-2 MSI uydu verilerinden yararlanmışlardır. Yanmış alanların tespit edilmesinde dNDVI ve dNBRI indekslerini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, Landsat-8 OLI uydu verisine göre daha iyi çözünürlüğe sahip Sentinel-2 MSI uydu verisinin doğruluğunun daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanında NBRI indeksinin, sensörden bağımsız olarak yanmış alanlarla daha güçlü korelasyon değerlerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Kesgin Atak ve Tonyaloğlu (2020), İzmir'in Gaziemir, Buca ve Karabağlar ilçelerinde 2019 yılında meydana gelen yangını inceledikleri çalışmalarında, yanmış alanların tespit edilmesinde Landsat-8 OLI ve Sentinel-2A uydu verilerini kullanmışlardır. NDVI, Atmosfere Dirençli Bitki İndeksi (ARVI- Atmospherically Resistant Vegetation Index), NBR, NBR2 ve BAI indeksleri yardımıyla yanmış alanları tespit etmeye çalışmışlardır. Bu indekslerin yanında nesne tabanlı görüntü sınıflandırma yöntemini de uygulamışlardır. Bu sınıflandırmayı çok çözünürlüklü segmentasyon ve en yakın komşu denetimli sınıflandırma yöntemi uygulanarak gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda NDVI, NBR2 ve ARVI indekslerinin yanmış alanların tespit edilmesinde yeterli doğrulukta sonuç çıktılarını üretebildiklerini ortaya koymuşlardır.

Cihan vd. (2022), 1 Temmuz 2017'de İzmir ilinin Menderes ilçesinde meydana gelen yangını inceledikleri çalışmalarında Landsat-8 OLI uydu görüntülerini kullanmışlardır. Yangın öncesinde ve yangın anına ait yer yüzey sıcaklık değerleri hesaplanmış ve farklılıklar irdelenmiştir. Yangın alanının belirlenmesinde NDVI ve NBRI indekslerinden yararlanılmıştır. Ayrıca piksel tabanlı görüntü sınıflandırma yöntemiyle de yanmış alanlar tespit edilmeye çalışılmıştır. Arazi kullanım sınıflarının yangından nasıl etkilendiğini belirlemek için CORİNE arazi kullanım haritasından yararlanılmışlardır. İndekslerden hesaplanan ve piksel tabanlı sınıflandırma yöntemine göre elde edilen yanmış alan değerleri OGM değerleri ile karşılaştırılmış ve değerler arasında tutarlılık olduğunu gözlemlemişlerdir.

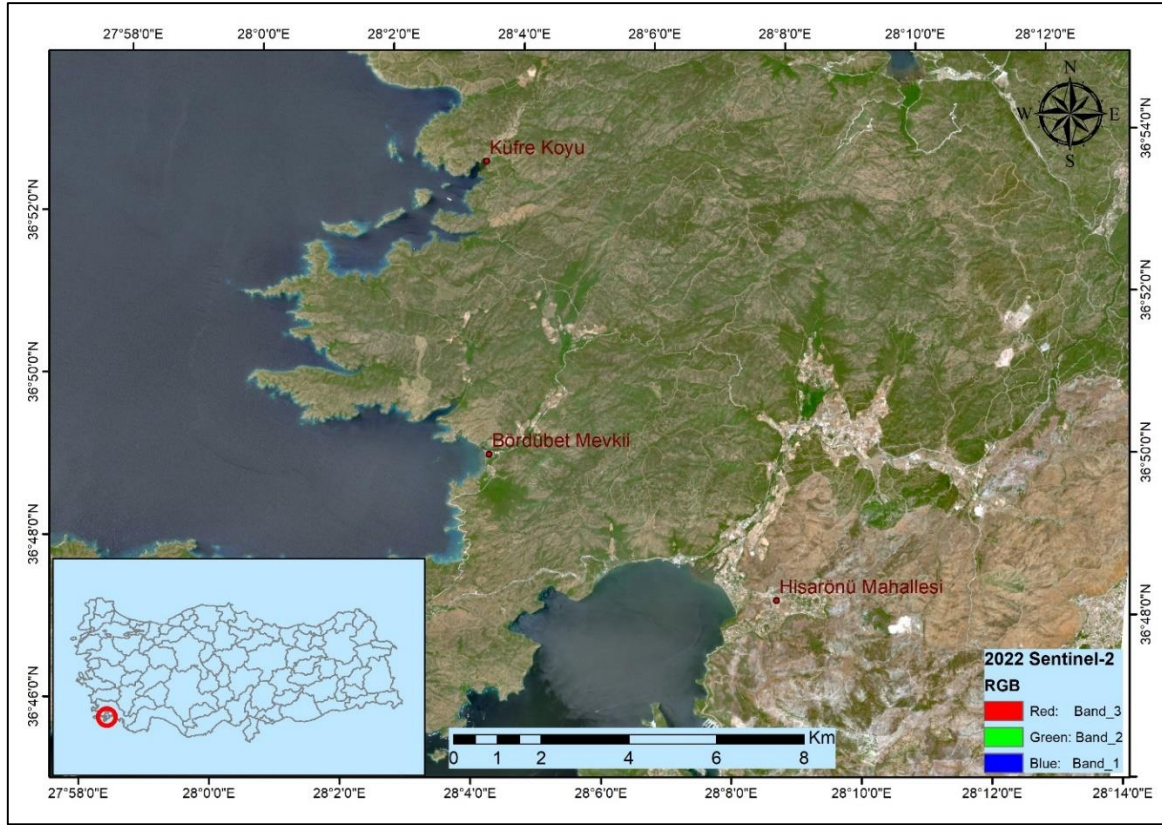
Yılmaz vd. (2022), çalışmalarında Çanakkale ilinin Gelibolu ilçesinde 2020 yılında meydana gelen orman yangınının incelemişler ve yanmış alanların tespit edilmesinde Sentinel-2 MSI ve Landsat-8 OLI uydu görüntülerinden yararlanmışlardır. Yangın alanının yangın öncesi ve yangın sonrasında ait BAI, NDVI, NBRI ve NDMI indekslerini hesaplamışlardır. Bu indeksler yardımıyla fark görüntüleri oluşturulmuş ve yanmış alanların tespitini yapmışlardır. Landsat-8 OLI ve Sentinel-2 MSI verilerinden elde edilen sonuçların doğruluk değerlendirmesini yapmış ve en doğru sonucu veren indeksin NDVI olduğunu tespit etmişlerdir.

Yapılan bu çalışmanın amacı, 21 Haziran 2022 tarihinde Muğla ili Marmaris ilçesinin Küfre koyu ve Hisarönü mahallesinde meydana gelen orman yangınında, yanmış alanların Sentinel-2 MSI ve Landsat-9 OLI uydu görüntüleriyle tespit edilmesidir. Navarro vd. (2017), Chung vd. (2019), Kesgin Atak ve Tonyaloğlu (2020), Yılmaz vd. (2022) çalışmalarında yanmış alanların tespit edilmesinde Sentinel-2 MSI uydu verilerini kullanmışlardır. Bu çalışmalarda ve yapacağımız çalışmada Sentinel-2 MSI verilerinin kullanılmasının temel nedeni yüksek zamansal çözünürlüğe (10 gün) sahip olmasıdır. Özellikle değişim belirleme çalışmalarında zamansal çözünürlük önemli faktördür. Buna ek olarak mekânsal çözünürlükte bantlara göre farklılık göstermekle birlikte Landsat verilerine göre

daha yüksektir. Çolak ve Sunar (2018), Quintano vd. (2018), García-Llamas vd. (2019), Yılmaz vd. (2022) çalışmalarında hem Sentinel-2 MSI hem de Landsat-8 OLI verileri kullanılmıştır. Her iki uydu verisinin kullanılmasıyla farklı verilerden elde edilen yanmış alan değerlerinin ve doğruluklarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kullanılan uydu verilerinden yanmış alanların tespit edilmesinde çalışmaların tamamında BAI, NDVI, NBRI, NDMI ve MIRBI gibi farklı indekslerden yararlanılmıştır. Literatürdeki çalışmalarla benzer amaç doğrultusunda tahrip olan orman alanlarının yangın öncesi ve yangın sonrasında ait Sentinel-2 MSI ve Landsat-9 OLI uydu verileri kullanılarak NBRI, NDVI, BAI ve NDMI uzaktan algılama indeksleri hesaplanmıştır. Yangın öncesi ve yangın sonrası ait indeks değerleri kullanılarak fark görüntüleri ve bu görüntülerden yanmış orman alanları hesaplanmıştır. İndekslerden elde edilen alanlar kendi içerisinde ve OGM'den elde edilen yanmış alan değeri ile karşılaştırılmıştır.

ÇALIŞMA ALANI VE KULLANILAN VERİLER

Çalışma alanı olarak Muğla ilinin Marmaris ilçesi seçilmiştir. 21 Haziran 2022 tarihinde meydana gelen yangın Marmaris ilçesinin Hisarönü mahallesi, Bördübet mevki ve Küfre Koyunda etkili olmuştur (Şekil 1). Marmaris ilçesi Türkiye'nin güneybatısında yer almaktadır. Ülkenin bu kesiminde yaz aylarında orman yangınları sıklıkla görülmektedir.



Şekil 1. Çalışma Alanı

Çalışmada Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI olmak üzere iki farklı uzaktan algılama verisi kullanılmıştır. Landsat-9 OLI 27 Eylül 2021'de Landsat serisinin son uydusu olarak uzaya fırlatılmıştır. Landsat-8 OLI'de bulunan sensörlerle benzerlik göstermektedir. Landsat-9 Collection 2 Level-2 verileri atmosferik düzeltmeleri ve radyometrik düzeltme işlemleri yapılmış halde kullanıma hazır şekilde sunulmaktadır. Landsat-9 OLI 11 spektral band içermektedir, termal ve pankromik band dışındakiler 30 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir. Termal band 100 m mekânsal çözünürlüğe, panoramik band ise 15 m mekânsal çözünürlüğe sahiptir (USGS, 2023a; Tablo 1). Landsat-9 OLI verileri <https://earthexplorer.usgs.gov/> adresinden temin edilmiştir.

Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından geliştirilen Sentinel-2 MSI uydu verisi 13 multi-spektral banda sahip olup bunların mekânsal çözünürlükleri; görünür ve kızılötesi-1 bandlar 10 m, kırmızı kenar, kısa dalga kızılötesi ve yakın kızılötesi-2 bandlar 20 m, üç farklı atmosferik düzeltme bandı da 60 m dir (Tablo 1). Sentinel-2 MSI yaygın olarak

arazi örtüsünün araştırılması, arazi kullanımının belirlenmesi, tarım alanlarının izlenmesi ve su kalitesi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Sentinel-2 uydusu, 20,6° görüş alanına sahiptir. Uydunun zamansal çözünürlüğü 10 gün olup yeryüzünden 786 km yükseklikte güneşle senkronize kutupsal bir yörüngede 290 km genişliğinde alanı tarayabilmektedir. Sentinel-2 MSI uydu verisi <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> adresinden temin edilmiştir. (USGS, 2023b; Roy vd. 2017).

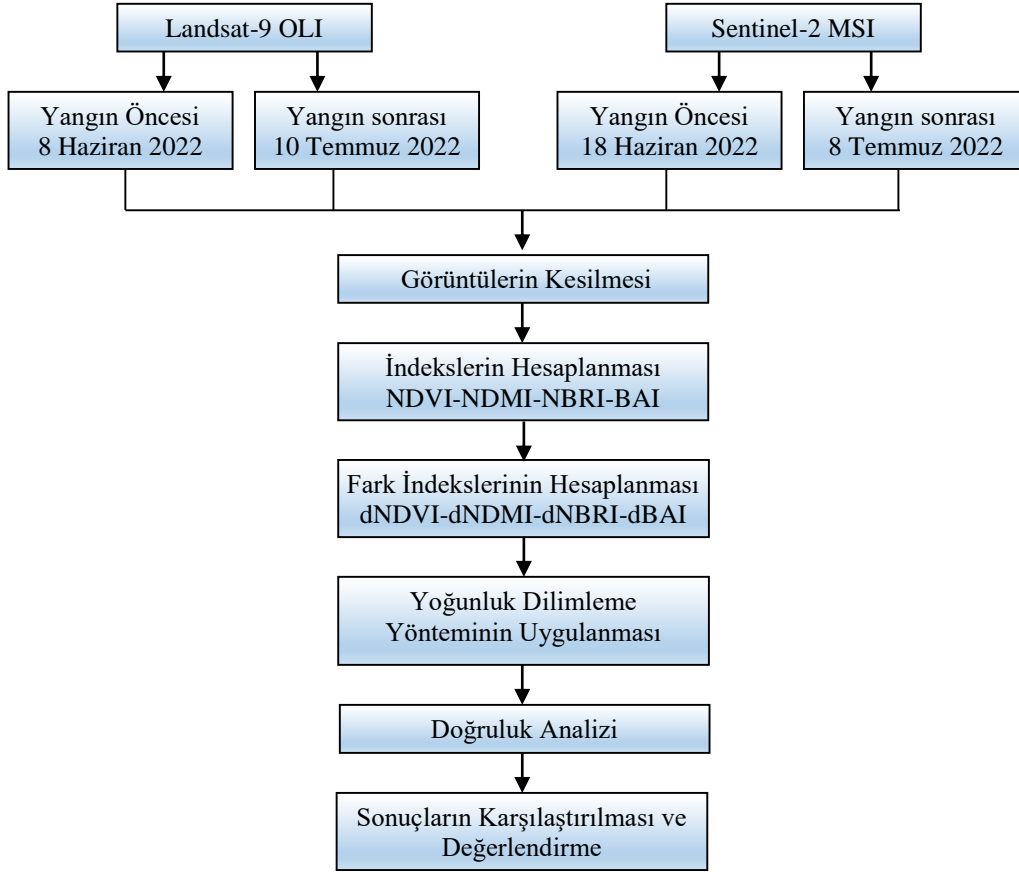
Tablo 1. Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI Uydularının Band Özellikleri (Landsat, 2023; Sentinels, 2023)

Sentinel-2 MSI			Landsat-9 OLI		
Bandlar	Mekânsal Çözünürlük	Spektral Çözünürlük (μm)	Bandlar	Mekânsal Çözünürlük	Spektral Çözünürlük (μm)
Band 1-Kıyı/Aerosol	60 m	0,443	Band 1-Kıyı/Aerosol	30 m	0,43 – 0,45
Band 2-Mavi	10 m	0,49	Band 2-Mavi	30 m	0,45 – 0,51
Band 3-Yeşil	10 m	0,56	Band 3-Yeşil	30 m	0,53 – 0,59
Band 4-Kırmızı	10 m	0,665	Band 4-Kırmızı	30 m	0,64 – 0,67
Band 5-Bitki Kırmızı Kenar	20 m	0,705	Band 5- Yakın Kızılötesi (NIR)	30 m	0,85 – 0,88
Band 6- Bitki Kırmızı Kenar	20 m	0,74	Band 6- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR-1)	30 m	1,57 – 1,65
Band 7- Bitki Kırmızı Kenar	20 m	0,783	Band 7- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR-2)	30 m	2,11 – 2,29
Band 8- Yakın Kızılötesi (NIR)	10 m	0,842	Band 8-Pankromik	15 m	0,50 – 0,68
Band 8A- Bitki Kırmızı Kenar	20 m	0,865	Band-9- Cirrus	30 m	1,36 – 1,38
Band 9- Su Buharı	60 m	0,945	Band 10-TIR-1	100 m	10,60 – 11,19
Band 10- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR-Sirrus)	60 m	1,375	Band 11-TIR-2	100 m	11,50 – 12,51
Band 11- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR-1)	20 m	1,61			
Band 12- Kısa Dalga Kızılötesi (SWIR-2)	20 m	2,19			

Çalışmada yangın öncesi ve yangın sonrası olmak üzere her iki uydu için farklı tarihli veri çiftleri kullanılmıştır. Yangın 21 Haziran tarihinde başlamış ve 25 Haziran tarihinde kontrol altına alınmıştır. Uydu verilerinin tarihleri seçilirken dikkat edilmesi gereken en önemli husus, yangın başlamadan öncesinde çalışma alanının ne durumda olduğunu ve yangın sonrasındaki durumunu ortaya koyabilmektir. Bunun yanında verilerdeki bulutluluk oranı da bir diğer önemli husustur. Bu durumlar göz önüne alınarak ve arşivdeki uydu verilerinin durumuna göre temin edilen Landsat-9 OLI verileri 8 Haziran 2022 ve 10 Temmuz 2022 tarihli, Sentinel-2 MSI uydu verileri 18 Haziran 2022 ve 8 Temmuz 2022 tarihli dir.

YÖNTEM

Çalışmamızda Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI uydu veri kullanılarak Muğla ili Marmaris ilçesinin Hisarönü mahallesi, Küfre koyu ve Bördübet mevkiilerinde etkili olan orman yangının farklı uzaktan algılama indeksleri kullanılarak tespit edilmiştir. Bu amaçla yangın öncesi ve sonrasına ait uydu verileri yangın alanın kapsayacak şekilde kesilmiştir. Sonrasında yangın tespit çalışmalarında kullanılan çeşitli indeksler hesaplanarak görüntüler işlenmiştir. Bu indekslerin yangın öncesi ve yangın sonrası değerleri kullanılarak fark görüntüleri elde edilmiştir. Fark görüntüleri kullanılarak her bir indekse ait doğruluk analizleri yapılmıştır. Yapılan bu analizlerde üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk ve kappa değerlerinin olduğu hata matrisleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. Bunun yanında OGM Orman Yangınlarıyla Mücadele Şube Müdürlüğü ile temasa geçilerek incelenen yangında yanan orman alanına ait yüzölçüm değeri temin edilmiştir. Bu değer farklı indekslerde elde edilen yanmış alan değerleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Çalışmanın İş Akış Şeması

Uzaktan Algılama İndeksleri

Orman yangınlarının da yanmış alanların tespit edilmesinde farklı uzaktan algılama indeksleri kullanılmaktadır. Çalışmada NDVI, NDMI, NBRI ve BAI olmak üzere 4 farklı uzaktan algılama indeksi kullanılmıştır (Liu vd. 2020).

Bitki örtüsünün belirlenmesinde en yaygın kullanılan indekslerden biri olan NDVI yanmış alanların tespit edilmesinde etkili sonuçlar vermektedir. Yakın kızılötesi ve kırmızı band kullanılarak hesaplanan NDVI (Eşitlik 1) indeksi, yeşil bitki örtüsünün görünür bölgedeki kırmızı ışığı absorbe etmesi ve yakın kızıl ötesi bölgesindeki ışığın yüksek yansıtmasından yararlanmaktadır. NDVI +1 ile -1 arasında değerler almaktadır. Canlı bitki örtüsünün olduğu bölgelerde bu değer +1'e yaklaşırken, bitki örtüsün zayıfladığı veya sağlığının düştüğü yerlerde 0'a yaklaşmaktadır. Bitki örtüsünün bulunmadığı alanlarda bu değer -1 olmaktadır (Fornacca vd. 2018). Yangın sonrasında bitki örtüsü büyük oranda zarar görmekte ve bu zarar görme neticesinde NDVI değerinde düşüş meydana gelir. Meydana gelen bu azalma neticesinde yanmış alanlar tespit edilebilmektedir.

$$NDVI = \left[\frac{NIR - RED}{NIR + RED} \right] \quad (1)$$

NDMI indeksi NIR ve SWIR bantları kullanılarak hesaplanır (Eşitlik 2). Tarım alanlarının veya su stresi olan alanların belirlenmesinde kullanılmaktadır. NDMI indeksi -1 ile +1 arasında değerler alır. Su miktarının yeterli olduğu veya su stresinin olmadığı yerlerde NDMI değeri +1'e yaklaşmaktadır. Bunun yanında, kuraklıkların ve yangına eğilimli alanlarda yakıt seviyelerini izlemek içinde kullanılır (Yılmaz vd. 2022; Taloor vd. 2021). Yangın sonrasında yüzeydeki nemlilik azalmakta veya yangının şiddetine göre tamamen ortadan kalkmaktadır. Yangın öncesi ve yangın sonrasında meydana gelen bu ani değişik NDMI indeksi ile tespit edilebilmekte ve yanmış alanların ortaya çıkarılmasına imkân sağlamaktadır.

$$NDMI = \left[\frac{NIR - (SWIR1)}{NIR + (SWIR1)} \right] \quad (2)$$

Yakın kızılötesi (NIR) ve kısa dalga kızılötesi bandlar (SWIR) kullanılarak oluşturulan bir diğer indeks ise NBRI indeksidir. NDVI formülünden farkı, kırmızı band yerine kısa dalga kızılötesi bandın kullanılmasıdır (Eşitlik 3). SWIR bandı nem içeriğine karşı duyarlıdır, bu nedenle yangın sonrasındaki bitki örtüsü değişikliklerinin tespit edilmesinde kullanılır. NBRI indeksi -1 ile +1 arasında değerler almaktadır. Bunun yanında yanmış alanlar SWIR bandında göreceli daha düşük yansıma sergilemektedir. Yüksek NBRI değeri genellikle sağlıklı bitki örtüsünü tanımlarken, düşük değerler çıplak zemini ve son zamanlarda yanmış alanları gösterir (Keeley, 2009; Miller ve Thode 2007; Key ve Benson 2005).

$$NBRI = \left[\frac{NIR - (SWIR2)}{NIR + (SWIR2)} \right] \quad (3)$$

BAI indeksi, kırmızı (RED) ve yakın kızılötesi (NIR) bandlardan yararlanarak yanmış alanları tespit etmektedir (Eşitlik 4). Bu indeks, yangın sonrası görüntülerde kömür sinyalini vurgulayarak kırmızından yakın kızılötesi spektruma kadar yanmış araziye vurgular. İndeks, her pikselden yakın zamanda yanan alanların birleştiği bir referans spektral noktasına olan spektral mesafeden hesaplanır. Çevresine göre daha parlak pikseller yanmış alanları gösterir (Chuvieco vd. 2002; Isabel, 1999).

$$BAI = \left[\frac{1}{(0,1 + RED)^2 + (0,06 + NIR)^2} \right] \quad (4)$$

Yoğunluk Dilimleme Yöntemi

İndekslerin yangın öncesi ve sonrasına ait görüntülerinden fark indeksleri elde edilir. Elde edilen fark indekslerinden yararlanarak orman yangınında tahrip olmuş alanlar ve yanmamış alanlar olarak iki sınıfa ayrılmasında yoğunluk dilimleme yöntemi kullanılmıştır. Yoğunluk dilimleme yöntemi, piksel değerlerinin farklı aralıklarla dilimlendiği ve her aralık için çıktı görüntüsünde tek bir değer veya rengin atandığı işlemidir. Yoğunluk dilimleme yöntemi seviye dilimleme yöntemi olarak da bilinmekte olup özellikle tek bantlı görüntülerde iyi sonuçlar vermektedir. Özellikle belirli bir yüzey özelliğinin benzersiz ve genellikle dar bir DN değerleri kümesine sahip olduğu durumlarda yararlıdır (Khorshid, 2016).

Doğruluk Değerlendirmesi

Yanmış alanların belirlenmesine yönelik indekslerin doğruluklarının belirlenmesi önem arz etmektedir. Doğruluk değerlendirilmesinde sınıflandırılmış veri ve arazi kullanım sınıflarının karşılaştırılması şeklinde yapılmaktadır. Bu karşılaştırmalarda hata matrisi kullanılması oldukça yaygın bir tekniktir. Hata matrisi referans verileri ve bu verilere karşılık gelen o sınıfa ait piksellerin ifade edildiği satır ve sütunlardan oluşan bir matristir (Rwanga ve Ndambuki, 2017). Hata matrisinde satırlar ve sütunlar biri referans verisini diğeri sınıflandırılan veriyi temsil edecek şekilde düzenlenir (Şekil 3).

		j = Sütunlar (Referans)			Satır toplamı n _{i+}
		1	2	k	
i = Satırlar (Sınıflandırma)	1	n ₁₁	n ₁₂	n _{1k}	n ₁₊
	2	n ₂₁	n ₂₂	n _{2k}	n ₂₊
	k	n _{k1}	n _{k2}	n _{kk}	n _{k+}
Sütun toplamı n _{-j}		n ₊₁	n ₊₂	n _{+k}	n

Şekil 3. Hata matrisinin gösterimi

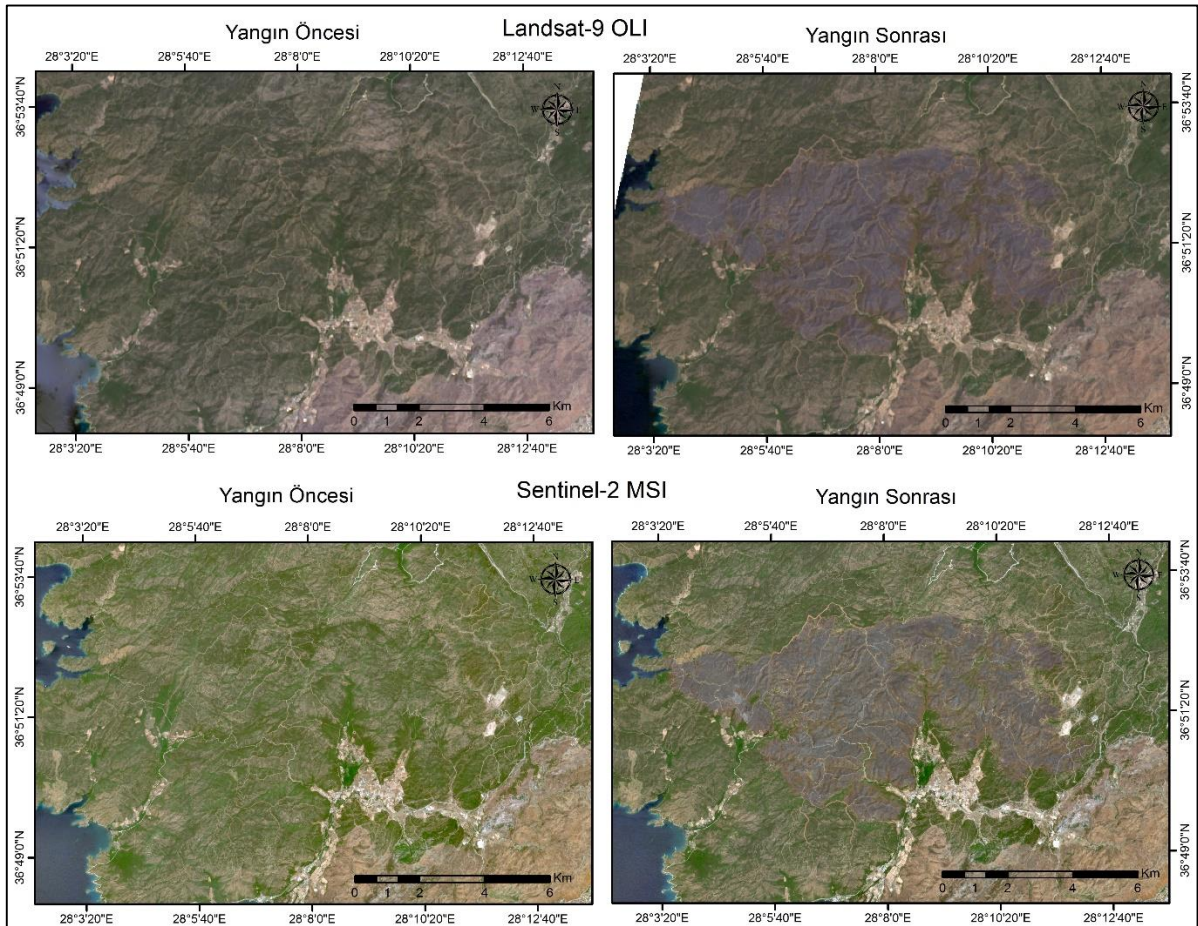
Hata matrisinde genellikle sütunlarda referans verileri, satırlarda sınıflandırılmış veriler listelenmektedir. Matrisin ana köşegeninde doğru sınıflandırılmış örnekler, ana köşegen dışındaki satırlar omisyon hatasını, ana köşegen dışındaki sütunlar ise komisyon hatasını ifade etmektedir. Her bir sınıf için üretici ve kullanıcı doğruluğu olmak üzere iki farklı doğruluk kriteri vardır. Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının o kategorideki toplam sütun sayısına bölünmesiyle üretici doğruluğu bulunur. Doğru sınıflandırılmış örnek sayısının o kategorideki toplam satır sayısına

bölünmesiyle ise kullanıcı doğruluğu bulunur. Genel doğruluk ana köşegeninde bulunan doğru sınıflandırılmış örnek sayısının toplam örnek sayısına bölünmesiyle bulunur. Bir diğer doğruluk değerlendirme ölçütü olan Kappa doğruluk analizi, hata matrisinin genel doğruluğu ve olasılık doğruluğu arasındaki fark olarak tanımlanır (Lillesand vd. 2015).

Üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu ve genel doğruluk için genel bir sınırlama olmayıp çalışmanın amacına göre değişiklik göstermektedir. Bu doğruluklar yüzdesel değeri temsil ettiği düşünüldüğünde başarılı bir sınıflandırma için bu değerlerin %70 üzerinde olması beklenmektedir. Kappa değeri 0-1 arasında değerler almaktadır. 0,20'den küçük değerler çok zayıf uyum, 0,21-0,40 arası değerler zayıf uyum, 0,41-0,60 arası değerler orta derece uyum, 0,61-0,80 arası değerler iyi uyum, 0,81-1,00 arası değerler ise güçlü uyumun olduğunu göstermektedir (Feizizadeh vd. 2022; Öztürk, 2022). Çalışmada indekslerin doğruluklarını değerlendirmek için üretici doğruluğu, kullanıcı doğruluğu, genel doğruluk ve kappa değerleri hesaplanmıştır (Rwanga & Ndambuki, 2017).

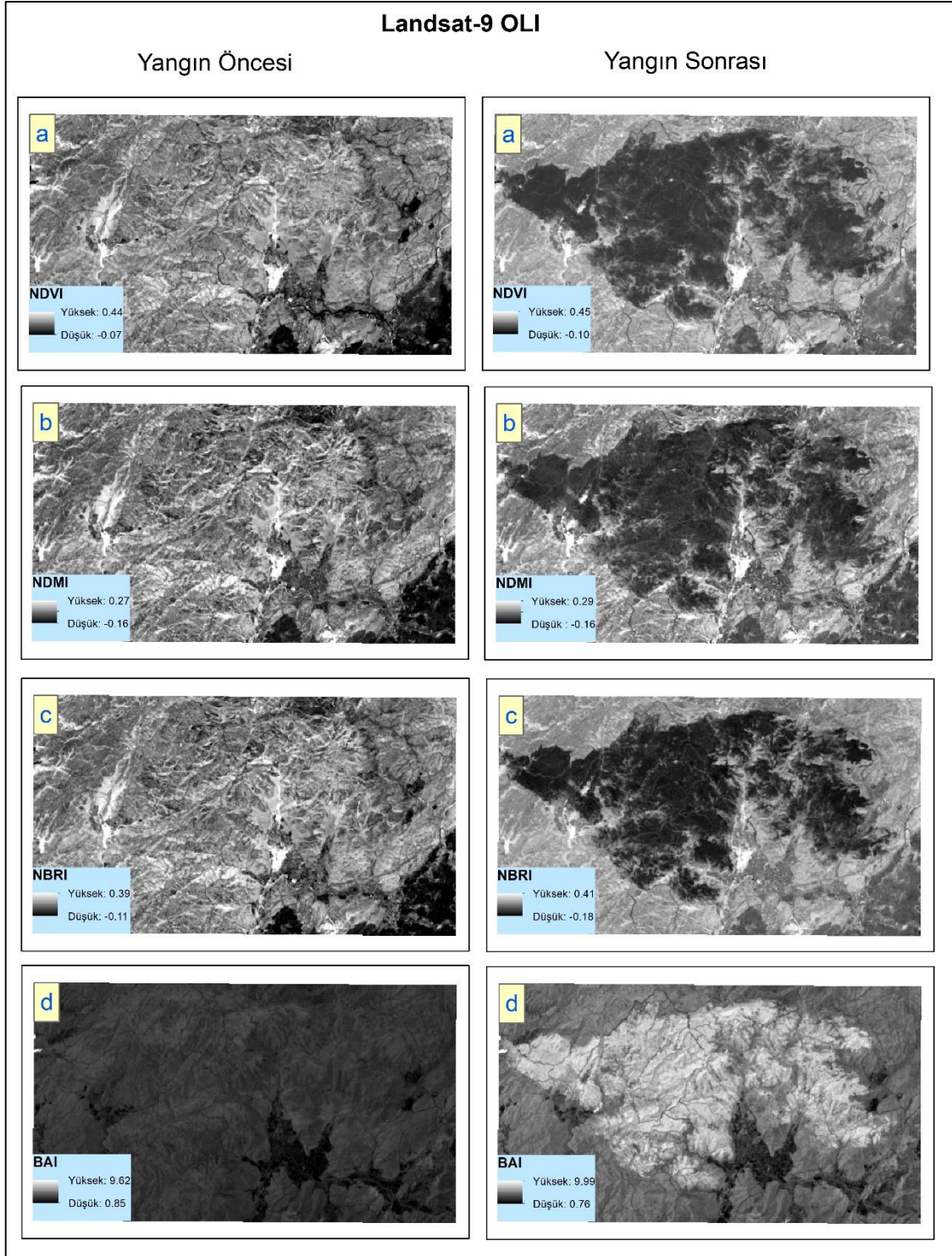
BULGULAR

Muğla ili Marmaris ilçesinin Hisarönü mahallesi, Küfre Koyu ve Bördübet mevkiilerinde etkili olan yangının tahrip ettiği orman alanının tespit edilmesi için Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI uydu verileri kullanılmıştır. Yangından etkilenen alanın doğal renk kombinasyonundaki yangın öncesi ve yangın sonrası durumu her iki uydu verisi için Şekil 4'de görülmektedir. Doğal renk kombinasyonu hem Landsat-9 OLI hem de Sentinel-2 MSI uydu verileri için Kırmızı: Band 4, Yeşil: Band 3 ve Mavi: Band 2 şeklindedir.

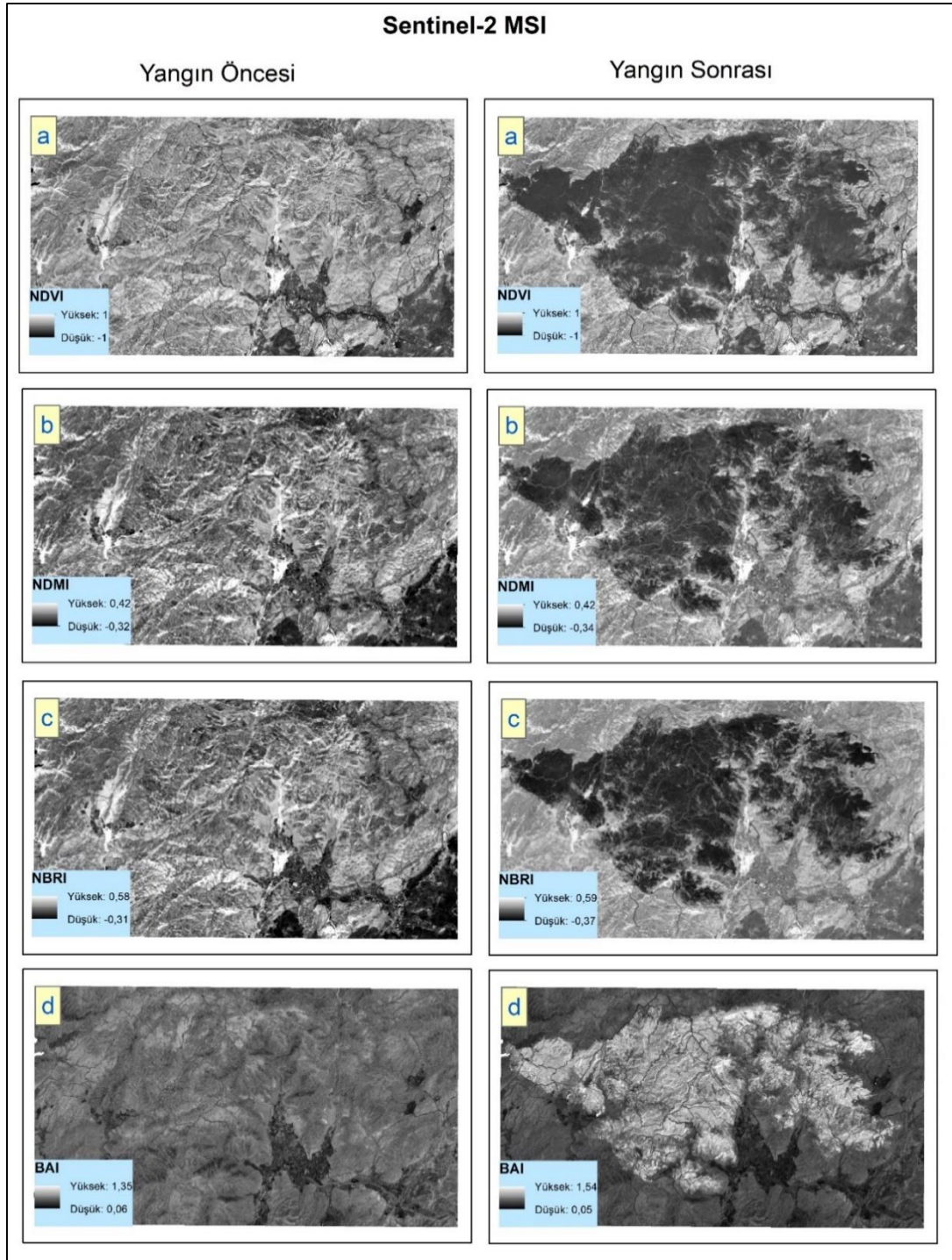


Şekil 4. Çalışma alanının Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI Yangın Öncesi ve Yangın Sonrası Görüntüleri

Yangından hasar gören alanı ortaya çıkarmak için NDVI, NDMI, NBRI ve BAI olmak üzere 4 farklı uzaktan algılama indeksi hesaplanmıştır. Bu indeksler hesaplanırken yangın öncesi ve yangın sonrası için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Şekil 5, Şekil 6).



Şekil 5. Yangın Öncesi ve Yangın Sonrasının Landsat-9 OLI Verisine Göre Spektral İndeksler, NDVI (a), NDMI (b), NBRI (c), BAI (d)

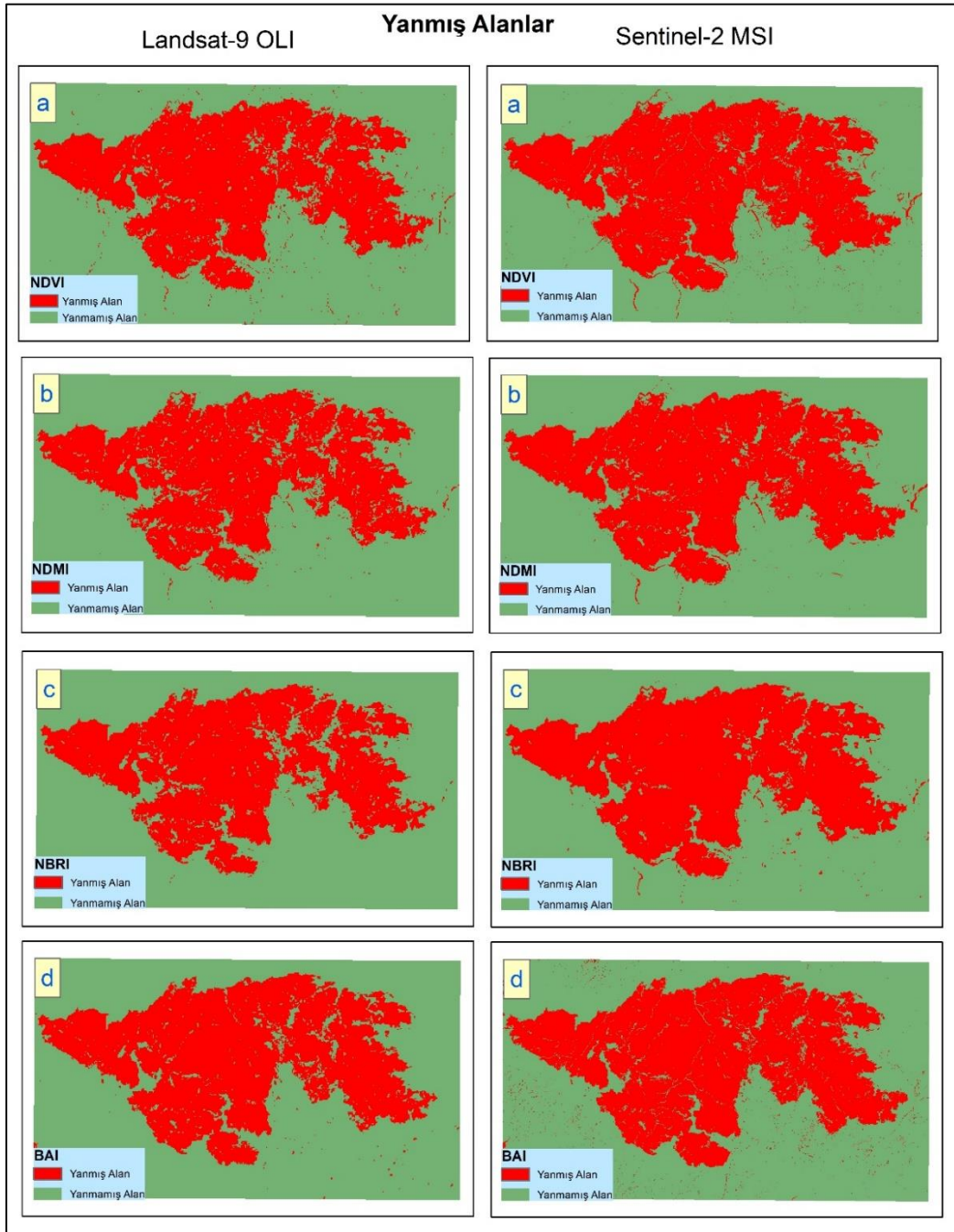


Şekil 6. Yangın Öncesi ve Yangın Sonrasının Sentinel-2 MSI Verisine Göre Spektral İndeksler, NDVI (a), NDMI (b), NBRI (c), BAI (d)

Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI görüntülerinden hesaplanan indekslerin görsel olarak yorumlanmasında; NDVI, NDMI ve NBRI indekslerinde yanmış alanların yangın öncesi durumuna göre daha koyu renkte, BAI indeksinde ise yanan alanların daha açık renkte olduğu görülmektedir. Bunun yanında BAI dışındaki indekslerde yanmış alanlar daha düşük piksel değerleri ile temsil edilirken, BAI indeksinde yanmış alanlar daha yüksek piksel değerleri ile temsil edilmektedir. Yangın öncesinde BAI indeksinde en yüksek piksel değeri 1,35 iken, yangın sonrasında 1,54 olmuştur. DN değerinin arttığı yerlerin yanmış alanlar olduğu görülmektedir. Özellikle Landsat-9 OLI verisinden elde edilen BAI indeksindeki piksel parlaklık değerleri diğer indekslere göre daha yüksek değere sahiptir. Landsat-9 OLI görüntüsüne ait NDVI indeksinde yangın öncesinde -0,07 olan en düşük değer, yangın sonrasında -0,10 olduğu görülmektedir. Yangın sonrasında bitki örtüsünün zarar görmesinden dolayı bu durum ortaya çıkmıştır. Sentinel-2 MSI görüntüsünde yangın öncesi ve yangın sonrası NDVI indeksi -1 ile +1 arasında değerler almıştır. Yangın

sonrasında piksel parlaklık değeri -1'e yakın piksellerin sayılarının arttığı gözlemlenmiştir. Yangın sırasında ortamdaki nem ve su kaybından dolayı NDMI indeksinde yanan alanlardaki değerler düşmüştür. Benzer durum NBRI indeksi içinde ortaya çıkmıştır. Buna ek olarak, yangın sonrasında sağlıklı bitki örtüsündeki azalma NBRI indeksindeki değerlerin düşmesine neden olmuştur. Yanmış alanların tespitinde çalışma alanının tamamını ait görüntülerdeki minimum ve maksimum değerlerde dikkate değer düşüşler meydana gelmeyebilir. Burada yanan alanın tespitindeki önemli nokta, aynı piksellerde meydana gelen dramatik değişimlerdir. Bu değişimlerde fark görüntüleri alınarak ortaya çıkarılmaktadır.

Yanmış alanların tespit edilmesinde indekslere ait yangın öncesi ve yangın sonrası görüntülerin farkları alınarak fark indeksleri hesaplanmıştır (Şekil 7). Yoğunluk dilimleme yöntemiyle fark görüntüleri yanan ve yanmamış alan olarak sınıflandırılmıştır. Fark görüntülerinin yoğunluk dilimleme yöntemine göre iki sınıfa ayrılmasında hem görüntülerin histogram dağılımından hem de görsel yorumlamayla eşik değeri belirlenmiştir. Belirlenen bu eşik değeri kullanılarak görüntü yanan ve yanmamış alan olarak sınıflandırılmıştır.



Şekil 7. Landsat-9 OLI ve Sentinel-2 MSI Görüntülerine Ait Fark İndeksleri Sonucu Elde Edilen Yanmış Alanlar, NDMI (a), NDMI (b), NBRI (c), BAI (d)

Farklı indekslere göre elde edilen yanmış alanların doğruluk değerlendirmesi için hata matrisleri kullanılmıştır. Yapılan doğruluk değerlendirmesinde 100 adet test noktası seçilmiştir. Test noktaları seçilirken çalışma alanı üzerinde homojen dağılmasına dikkat edilmiştir. Yer gerçekliği olarak yangın tarihine yakın Sentinel-2 uydu verisine ait farklı bir görüntü kullanılmıştır. Her iki algılayıcıdan elde edilen fark görüntülerinden test noktaları kullanılarak hata matrisleri hesaplanmıştır. Hata matrislerinde her bir fark indeksi için Üretici Doğruluğu, Kullanıcı Doğruluğu, Genel Doğruluk ve Kappa Değeri hesaplanmıştır (Tablo 3). Elde edilen sonuçlara göre Landsat-9 OLI verisi için en yüksek genel doğruluk 0,97 ve en yüksek Kappa değeri 0,94 ile NBRI indeksine aittir. Sentinel-2 MSI verisi için en yüksek genel doğruluk 0,99 ve en yüksek Kappa değeri 0,98 ile NBRI indeksine aittir. Landsat-9 OLI için 0,95 ile en düşük genel doğruluk ve 0,90 değeri ile en düşük Kappa değeri NDVI ve NDMI indekslerine aittir. Sentinel-2 MSI için 0,97 ile en düşük genel doğruluk ve 0,94 ile en düşük Kappa değeri NDMI indeksine aittir. Yanmış alanlar için en yüksek kullanıcı doğruluğu Landsat-9 OLI uydu verisinde 0,95 değeri ile NBRI indeksine aittir. Yanmış alanlar için üretici doğruluğu ise 1,00 değeri ile NDVI ve NDMI indekslerine aittir. Sentinel-2 MSI verisinde yanmış alanlar için en yüksek kullanıcı doğruluğu 0,98 değeri ile NBRI ve BAI indekslerine, en yüksek üretici doğruluğu ise 1,00 değeri ile NDVI, NDMI ve NBRI indekslerine aittir.

Genel doğruluklar ve Kappa değerleri göz önüne alındığında Sentinel-2 MSI verilerinin daha yüksek değerlere sahip oldukları görülmektedir. Bunun temel nedeninin, Sentinel-2 MSI verisinin mekânsal çözünürlüğü görünür bölge bandları için 10 m iken Landsat-9 OLI verisinde mekânsal çözünürlüğün 30 m olmasıdır. Kızılötesi bölge bandları içinde bu mekânsal çözünürlük farklılığı hesaplanan indekslerdeki doğruluk oranları üzerinde etkilidir. Hesaplanan indeksler arasında en yüksek genel doğruluk değerinin her iki uydu verisi içinde NBRI indeksi olduğu görülmektedir. NBRI indeksinde kısa dalga kızılötesi band (SWIR) kullanılmaktadır. Bu band nem içeriğine karşı duyarlıdır, bu nedenle yangın sonrasındaki bitki örtüsü değişikliklerinin tespit edilmesinde etkili sonuçlar vermektedir.

Tablo 3. Landsat-9 OLI, Sentinel-2 MSI Verilerinden Farklı İndekslere Göre Elde Edilen Fark Görüntülerinin Doğruluk Değerlendirmesi

Landsat-9 OLI		NDVI	NDMI	NBRI	BAI
Kullanıcı Doğruluğu	Yanmış	0,90	0,90	0,95	0,94
	Yanmamış	1,00	1,00	0,98	0,98
Üretici Doğruluğu	Yanmış	1,00	1,00	0,97	0,98
	Yanmamış	0,90	0,90	0,96	0,94
Genel Doğruluk		0,95	0,95	0,97	0,96
Kappa Değer		0,90	0,90	0,94	0,92
Sentinel-2 MSI		NDVI	NDMI	NBRI	BAI
Kullanıcı Doğruluğu	Yanmış	0,96	0,94	0,98	0,98
	Yanmamış	1,00	1,00	1,00	0,98
Üretici Doğruluğu	Yanmış	1,00	1,00	1,00	0,98
	Yanmamış	0,96	0,94	0,98	0,98
Genel Doğruluk		0,98	0,97	0,99	0,98
Kappa Değeri		0,96	0,94	0,98	0,96

Fark indekslerinden elde edilen yanmış alanlar, OGM (Orman Genel Müdürlüğü) Orman Yangılarıyla Mücadele Şube Müdürlüğü'nden temin edilen yanmış alan değeri ile karşılaştırılmıştır (Tablo 2). OGM'den temin edilen yanmış alan değerine en yakın sonuçları Landsat-9 OLI görüntüsünde NDMI indeksinin elde ettiği görülmektedir. Bu değeri sırasıyla NDVI, NBRI ve BAI indeksleri takip etmektedir. Sentinel-2 MSI verisinde ise referans verisine en yakın sonucu NDVI indeksi elde etmiştir. NDVI değerine oldukça yakın çıkan NBRI değeri referans verisine en yakın ikinci değerdir. Bu iki indeksi NDMI ve BAI indeksleri izlemektedir. Her iki uydu verisinde elde edilen sonuçların OGM değerlerinden düşük olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Landsat-9 OLI, Sentinel-2 MSI Verilerinden Farklı İndekslere Göre Elde Edilen ve OGM Temin Edilen Yanmış Alan Değerleri

	OGM	NDVI	NDMI	NBRI	BAI
Landsat-9 OLI (Hektar)	4392,5	4219,82	4271,21	4191,93	4077,14
Sentinel-2 MSI (Hektar)	4392,5	4284,25	4253,67	4281,86	4107,95

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada 21 Haziran 2022 tarihinde Muğla ili Marmaris ilçesinin Küfre Koyu ve Hisarönü mahallesinde meydana gelen orman yangını Sentinel-2 MSI ve Landsat-9 OLI uydu görüntüleriyle incelenmiştir. Bu amaçla yanan orman alanlarının tespiti için literatürde yaygın olarak NDVI, NDMI, NBRI ve BAI uzaktan algılama indeksleri kullanılmıştır. İki farklı uydudan elde edilen görüntülerin yangın öncesi ve yangın sonrasında ait NDVI, NDMI, NBRI ve BAI indeksleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu görüntüler birbirinden çıkarılarak fark görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen fark görüntüleri yoğunluk dilimleme yöntemiyle iki sınıfa ayrılarak yanmış alanlar tespit edilmiştir. Dört farklı indekse göre tespit edilen yanmış alanlar OGM'den temin edilen değerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda OGM değerlerine en yakın sonuçların; Landsat-9 OLI görüntüsünde 4271,21 hektar ile NDMI, Sentinel-2 MSI görüntüsünde 4284,25 hektar ile NDVI indekslerinin olduğu tespit edilmiştir. Yoğunluk dilimleme yöntemine göre iki sınıfa ayrılmış görüntülerin doğruluk analizi yapılmıştır. Genel doğruluk ve Kappa değerlerine göre Sentinel-2 MSI görüntüsü, Landsat-9 OLI görüntüsüne göre daha yüksek değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Landsat-9 OLI görüntüsünde NBRI indeksi 0,97 genel doğruluk ve 0,94 Kappa değeri ile en yüksek sonuçları ortaya koyarken, Sentinel-2 MSI görüntüsünde 0,99 genel doğruluk ve 0,98 Kappa değeri ile NBRI indeksi en yüksek değerleri elde etmiştir.

Bu alanda yapılmış çalışmalar incelendiğinde; Sabuncu ve Özener (2019) NDVI ve NBR indekslerinden, Kesgin Atak ve Tonyaloğlu (2020) NDVI, ARVI, NBR, NBR2 ve BAI indekslerinden, Cihan vd. (2022) NDVI ve NBRI indekslerinden, Yılmaz vd. (2022) BAI, NDVI, NBRI ve NDMI indekslerinden yararlanmışlardır. Yapılan bu çalışmalar göz önüne alındığında yaptığımız çalışmada kullandığımız NDVI, NDMI, NBRI ve BAI indekslerinin yanmış alanların tespit edilmesinde kullanılabilir olduğu göstermektedir. Kullanılan indekslere göre hesaplanan alanlar Sabuncu ve Özener (2019), Cihan vd. (2022) çalışmalarında olduğu gibi OGM tarafından açıklanan yanmış alan verileriyle karşılaştırılmıştır. Bunun yanında sınıflandırma işlemlerine ait doğruluk değerlendirmeleri de yapılmıştır. Her indeks aynı düzeyde doğruluk değerlerine sahip olmadığı ancak alansal sonuçlar göz önüne alındığında, özellikle Sentinel-2 MSI, elde ettiğimiz sonuçlarda 4284,25 hektar ile NDVI ve 4281,86 hektar ile NBRI indekslerinin OGM hasar tespit sonucu belirlediği 4392,5 hektarlık alan değerine yakın oldukları görülmektedir. OGM'nin elde ettiği yanmış alanlara ait alansal değerlerin hangi yöntemlere göre hesaplandığı konusunda bilgi alınamamıştır.

Çalışmada kullandığımız indekslerden elde edilen alansal değerlerdeki farklılığın iki nedenle ortaya çıktığı düşünülmektedir. İlk neden indekslerin hesaplanmasında kullanılan formülasyon ve farklı band kombinasyonlarıdır. Yanma sonucunda bitkilerde fiziksel ve kimyasal değişimler meydana gelmektedir. Çalışmada kullanılan indeksler göz önüne alındığında, bitki örtüsündeki fiziksel ve kimyasal değişimlere duyarlı bantlar ve bu değişimleri doğru tespit edebilen indekslerin sonuçlarının daha tutarlı olduğu görülmektedir. İndekslere göre alansal farklılıkların bir diğer nedeni ise yoğunluk dilimleme yöntemindeki kullanılan eşik değeridir. Eşik değerinin büyük veya küçük seçilmesi alansal değerlerde değişmeye neden olmaktadır. İleride yapılması planlanan çalışmalarda Jenks doğal kırıklar algoritması ve Otsu eşik belirleme yöntemleri gibi farklı metotlar denenerek yanmış alanların hesaplanması yapılabilir.

Ormanlar dünyanın en büyük doğal zenginlik kaynağıdır. Doğal nedenlerle veya insan kaynaklı meydana gelen orman yangınları doğal ve ekolojik çevreye büyük zararlar vermektedir. Uzaktan algılama teknolojileri yangın alanlarının takibi, yangın yönetimi ve yangın sonrası meydana gelen hasarların tespit edilmesinde etkili bir araçtır. Bu amaçla yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinden ve farklı uzaktan algılama indekslerinden daha fazla yararlanılmalıdır. Bunun yanında ormanların korunması, yanan orman alanlarının ağaçlandırılması ve yangınlar konusunda insanların bilinçlendirilmesine de önem verilmelidir.

KAYNAKLAR

- Botella-Martínez, M. A., & Fernández-Manso, A. (2017). Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images. *Revista de Teledetección*, (49), 33-47. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>
- Chen G., Metz M.R., Rizzo D.M., & Meentemeyer R.K., (2015). Mapping burn severity in a disease-impacted forest landscape using Landsat and ASTER imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 40(2015), 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.04.005>
- Chuvieco, E., Martín, M. P., & Palacios, A. (2002). Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5103-5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Chung, M., Jung, M., & Kim, Y., (2019). Wildfire damage assessment using multi-temporal Sentinel-2 data, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(3/W8), 97-102. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-97-2019>
- Cihan, A., Cerit, K., & Erener, A., (2022). Yangın Alanında Uydu Görüntüleri ile Yer Yüzey Sıcaklık Değişimi Gözlemi ve Mekânsal Alan Tespiti. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8(1), 142-155. <https://doi.org/10.21324/dacd.942724>
- Çolak E., & Sunar A.F., (2018). Remote sensing & GIS integration for monitoring the areas affected by forest fires: A case study in Izmir, Turkey. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives*, 42(3W4), 165-170. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W4-165-2018>
- Ertuğrul M., (2005). Orman Yangınlarının Dünyadaki ve Türkiye'deki Durumu. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 7(7), 43-45.
- Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T., & Lakes, T. (2022). QADI as a new method and alternative to kappa for accuracy assessment of remote sensing-based image classification. *Sensors*, 22(12), 4506. <https://doi.org/10.3390/s22124506>
- Fornacca D., Ren G., Xiao W., (2018), Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a mountainous region of northwest Yunnan, China, *Remote Sensing*, 10(8), 1196. <https://doi.org/10.3390/rs10081196>
- García-Llamas P., Suárez-Seoane S., Fernández-Guisuraga J. M., Fernández-García V., Fernández-Manso A., Quintano C., Taboada A., Marcos E., & Calvo L., (2019). Evaluation and comparison of Landsat-8, Sentinel-2 and Deimos-1 remote sensing indices for assessing burn severity in Mediterranean fire-prone ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80(2019), 137-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.006>
- Gonçalves, A. C., & Sousa, A. M. (2017). The fire in the Mediterranean region: a case study of forest fires in Portugal. *Mediterranean Identities-Environment, Society, Culture; Fuerst-Bielis, B., Ed*, 305-335. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69410>
- Isabel, M. P. M. (1999). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR (Doctoral dissertation, Universidad de Alcalá).
- Kesgin Atak B., & Tonyaloğlu E., (2020). Evaluating spectral indices for estimating burned areas in the case of Izmir/Turkey. *Eurasian Journal of Forest Science*, 8(1), 49-59. <https://doi.org/10.31195/ejefjs.657253>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2005). Landscape assessment: remote sensing of severity, the normalized burn ratio and ground measure of severity, the composite burn index. *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system Ogden, Utah: USDA Forest Service, Rocky Mountain Res. Station*.
- Keeley J.E., (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Khorshid, K. (2016). Impervious Surface Estimation and Mapping via Remotely Sensed Techniques, M.Sc. Thesis, İstanbul Technical University Graduate School Of Science Engineering And Technology, Department of Geomatics Engineering Geomatics Engineering Programme, İstanbul.

- Landsat. (2023). Landsat Satellites. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/> Erişim tarihi: 24.07.2023
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons.
- Liu S., Zheng Y., Dalponte M., & Tong X., (2020), A novel fire index-based burned area change detection approach using Landsat-8 OLI data, *European Journal of Remote Sensing*, 53(1), 104-112. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1738900>
- Miller J.D., & Thode A.E., (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- Navarro G., Caballero I., Silva G., Parra P.C., Vázquez Á., & Caldeira R., (2017). Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58(2017), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.003>
- O. G. M. (2023), T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı Orman Genel Müdürlüğü 2022 Yılı Faaliyet Raporu, <https://www.ogm.gov.tr/faaliyet-raporu>. Erişim tarihi: 24.07.2023
- ÖZTÜRK, D. (2022). Sentinel-2A MSI ve Landsat-9 OLI-2 Görüntüleri Kullanılarak Farklı Geçirimsiz Yüzey İndekslerinin Karşılaştırmalı Değerlendirmesi: Samsun Örneği. *Ege Coğrafya Dergisi*, 31(2), 401-423. <https://doi.org/10.51800/ecd.1175827>
- Quintano C., Fernández-Manso A., & Fernández-Manso O., (2018). Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64(2018), 221-225. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.014>
- Roy, D. P., Li, J., Zhang, H. K., Yan, L., Huang, H., & Li, Z. (2017). Examination of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) reflectance anisotropy and the suitability of a general method to normalize MSI reflectance to nadir BRDF adjusted reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 199, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.019>
- Rwanga S., & Ndambuki J., (2017), Accuracy assessment of land use/land cover classification using remote sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8(04), 611-622. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Sabuncu A., Özener H., (2019), Uzaktan algılama teknikleri ile yanmış alanların tespiti: İzmir Seferihisar orman yangını örneği, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2), 317-326. <https://doi.org/10.21324/dacd.511688>
- Sarp, G., Temuçin, K., Aldırmaz, Y., & Baydoğan, E. (2018). Spatial analysis of forest fires using remote sensing technologies; a case of 2017 Mersin-Anamur forest fire. In 2018, Innovation and Global Issues Congress IV, pp 300-308.
- Sentinels. (2023). Sentinel-2 MSI User Guide. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi> Erişim tarihi: 24.07.2023
- Taloor, A. K., Manhas, D. S., & Kothiyari, G. C. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>
- U.S. Geological Survey (2023a). Landsat 9 Data Users Handbook: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-9-data-users-handbook>. Erişim tarihi: 24.07.2023
- U.S. Geological Survey (2023b). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>. Erişim tarihi: 24.07.2023
- U.N.E.P (2023). United Nations Environment Programme, Climate & Wildfire Information - A Report By UNEP, <https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape>. Erişim tarihi: 24.07.2023
- Yılmaz, B., Demirel, M., & Balçık, F. (2022). Yanmış alanların sentinel-2 msi ve landsat-8 olı ile tespiti ve analizi: Çanakkale/Gelibolu orman yangını. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 8 (1). <https://doi.org/76-8.10.21324/dacd.941456>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.06.2023
Kabul Tarihi : 21.10.2023

Received Date : 14.06.2023
Accepted Date : 21.10.2023

DEĞER AKIŞ HARİTALAMA YÖNTEMİ VE BİR İMALAT İŞLETMESİNDE UYGULANMASI

VALUE STREAM MAPPING METHOD AND APPLICATION IN A MANUFACTURING COMPANY

Eda COŞKUN¹ (ORCID: 0009-0007-4088-2828)
Selçuk ÖZCAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-5509-1534)

¹ Karabük Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Selçuk ÖZCAN, selcukozcan@karabuk.edu.tr

ÖZET

Teknolojinin gelişimi, birçok sektörün daha geniş bir kitleye hitap etmesine olanak sağlamaktadır. Bu durum, firmalar arasındaki rekabeti artırmakta ve daha fazla müşteri ile etkileşime geçmelerini gerektirmektedir. Çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren şirketler, kaliteyi artırmak, maliyeti düşürmek, üretimi verimli hale getirmek, israfi azaltmak, hurda miktarını düşürmek ve müşteri taleplerini zamanında karşılamak için yalın kavramını benimsemektedir. Yalın üretim teknikleri, aynı hedefe hizmet etmelerine rağmen uygulanmaları açısından farklılık göstermektedir. Yalın üretim yöntemlerinden biri olan Değer Akışı Haritalama (DAH) yöntemi, üretim sürecinde akışı bozan darboğazları ve tüm süreçle ilgili gerekli bilgileri görsel olarak sunmaktadır. Ayakkabı yan sanayisinde üretim yapan bir firma tarafından yapılan bu çalışmada; değer yaratmayan faaliyetleri ortadan kaldırarak üretim süresini kısaltmak ve müşteri taleplerini daha hızlı karşılamak amaçlanmaktadır. Bu amaç doğrultusunda ürün ailesi seçimi için ABC analizi kullanılmış ve sonrasında DAH yöntemi uygulanmıştır. Sünger ana malzemesiyle üretilen ürünler için mevcut durum haritası çizilmiş ve iyileştirme fırsatları belirlenmiştir. İyileştirmelerin yapılabilmesi için gelecek durum haritası ve spagetti diyagramı çizilmiştir. Gerçekleştirilen iyileştirmeler sonucunda üretim akışı 32,25 günden 23,5 güne düşürülmüştür. Ayrıca, malzeme dolaşımı 262,25 metreden 233,8 metreye indirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yalın üretim, değer akış haritalama, spagetti diyagramı, abc analizi

ABSTRACT

The advancement of technology enables many sectors to reach a wider audience. This situation increases competition among companies and requires them to engage with more customers. Companies operating in various sectors adopt the lean concept to improve quality, reduce costs, make production efficient, minimize waste, reduce scrap quantities, and meet customer demands in a timely manner. Although lean production techniques serve the same purpose, they differ in terms of their implementation. One of the lean production methods, Value Stream Mapping (VSM), visually presents the bottlenecks that disrupt the flow in the production process and provides necessary information about the entire process. In this study carried out by a company engaged in production in the shoe industry; It is aimed to shorten production time and meet customer demands faster by eliminating activities that do not create value. For this purpose, the ABC analysis was used for the product family selection step using the VSM method. The current state map was drawn for products manufactured with sponge as the main material, and improvement opportunities were identified. To implement the improvements, the future state map and spaghetti diagram were drawn. As a result of the implemented improvements, the production lead time was reduced from 32.25 days to 23.5 days. Additionally, material circulation was reduced from 262.25 meters to 233.8 meters.

Keywords: Lean manufacturing, value stream mapping, spaghetti diagram, abc analysis

GİRİŞ

Dünyada meydana gelen ekonomik ve siyasi değişimlerle baş edebilmek çağımızın önemli problemlerinden biri haline gelmiştir. Gün geçtikçe değişim yakalanamayacak bir hızla ilerlemektedir. Teknolojinin gelişimiyle iletişim kolaylaşmış ve dünya küçük bir pazar haline gelmiştir. Toplumlar zenginleştikçe, eğitim seviyesi artmakta ve tüketiciler daha bilinçli alışveriş yapmaktadırlar. Bütün kriterlerin bir araya gelmesiyle şirketler yalnızca buldukları bölgeye değil tüm dünyaya hitap etmektedirler. Böylece aynı sektörde bulunan tüm şirketlerle rekabet halindedirler. Şirketler bir yandan ayakta durabilmek için müşteri taleplerini eksiksiz ve zamanında karşılamaya çalışırken bir yandan da büyüyüp daha fazla müşteriye hitap etmek istemektedirler. Bu amaca ulaşabilmek için firmalar “Yalın” kavramına başvurumaktadırlar.

Yalın kavramı, süreçlerin planlı ve etkin bir şekilde çalışmasını istemektedir. Bu çalışma sistemi, müşterinin talep ettiği ürünün daha hızlı, daha kaliteli ve daha ucuz üretilmesine yardımcı olmaktadır. Bu kriterleri sağlayan firmalar rekabet ortamında başarı ortaya koymaktadırlar. Rekabet ortamında başarılarıyla anılmak isteyen ve büyümeyi hedefleyen firmalar yalın üretim tekniklerini uygulamaktadırlar. Yalın üretim, kaliteyi arttırmak, maliyeti düşürmek, israfı ve fire miktarını azaltmak için farklı teknikleri kullanmaktadır. Tüm teknikler aynı amaca hizmet etseler bile bunu farklı şekillerde yapmaktadırlar. Yüksek kalite ve düşük maliyetlerle üretim yapabilmek için çok tercih edilen yöntemlerden biri de DAH yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

DAH, bir süreçteki bilgi ve malzeme akışında değer yaratan ve yaratmayan faaliyetleri görsel bir şekilde gösteren araçtır. Yöntem; israfın azaltılması, ürünün müşteriye daha hızlı teslim edilmesi, müşterinin taleplerine tam anlamıyla cevap verilmesi, ara stok miktarının azaltılması konularındaki iyileştirme fırsatlarını göstermektedir. Bunların dışında haritada; çalışılan net zaman, çevrim süresi, lojistiğin hangi araçla yapıldığı, tedarikin ve sevkiyatın ne sıklıkla yapıldığı, kalıp değişim süresi, ihtiyaç duyulan çalışan sayısı gibi bilgileri barındırmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; ayakkabı yan sanayi sektöründe faaliyet gösteren bir firmada üretim akış süresini azaltmaktır. İlk aşamada DAH yapılacak ürün grubu belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için ürün gruplarının önem sırasına göre sınıflandırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. ABC analizi ile ihtiyaç duyulan sınıflandırma yapılmış ve firma için en fazla satışı olan ürün grubu belirlenmiştir. İkinci aşamada belirlenen ürün grubuna ait mevcut durum haritası çizilmiş ve iyileştirme fırsatları ortaya çıkarılmıştır. Üçüncü aşamada mevcut durumda malzeme dolaşımını bulabilmek için Spagetti diyagramı çizilmiştir. Dördüncü aşamada tesis içi makine yerleşim düzeninde değişiklikler önerilmiştir. Son aşamada ise bu öneriler temelinde gelecek durum haritası çizilmiş ve spagetti diyagramı oluşturulmuştur.

Literatür Taraması

DAH, üretimin var olduğu her alanda kullanılabilen kapsamlı bir yöntemdir. Bu yöntem hizmet üretim sektöründe kullanılabildiği gibi çoğunlukla mamul üretim sektöründe uygulanmaktadır. Çünkü mamul üretimi çok daha karmaşık süreçleri barındırmaktadır. Bu karmaşıklık içinde DAH yöntemi tüm imalat sürecinin bir bakışta kolaylıkla anlaşılmasını sağlamaktadır.

DAH yöntemini Womack, Jones ve Ross 1990-1995 yıllarında geliştirmişlerdir (Emir ve Gergin, 2021). Womack, Jones ve Ross bir ürün veya hizmet üretiminin başlangıcından müşteriye ulaşana kadar olan süreçteki israfı açık bir şekilde görebilmek amacı ile DAH yöntemini geliştirmişlerdir. DAH'ın en temel avantajları; israfı azaltmak, müşteri ihtiyaçlarına tam anlamıyla cevap vermek, ürün veya hizmetin teslim zamanını en aza indirmek ve malzeme akışının iyileştirilmesine yardımcı olmaktır (Tuzcu, 2019).

Bu yöntemin kullanıldığı çalışmalar incelendiğinde benzer çıktıların elde edildiği görülmektedir. İmalat ortamında tüm dünyada benzer sorunlar bulunmaktadır. İşletmeler bu sorunlara çözüm getirmek istemektedirler. Çözüm sonucunda işletmeler; kalitenin artırılması, israfın yok edilerek karın artırılması, müşteriye verilen sipariş sözünün tam zamanında ve eksiksiz olarak ulaştırılması amaçlamaktadırlar. Bu amaçlar doğrultusunda çeşitli sektörlerde DAH yöntemi ve bu yöntemi destekleyecek farklı yöntemler kullanıldığı görülmektedir.

Bir tekstil fabrikasında darboğazların iyileştirilmesinde (Bilici ve Kosanoğlu 2021), otomotiv sektöründe malzeme ve bilgi akışını sadeleştirilerek üretim akışının hızlanmasında (Kahrıman, 2013), bir imalat işletmesinde değer katan ve katmayan işlemlerin ayrıştırılarak müşteri talebini daha hızlı ve kolay bir şekilde karşılaması için yapılan iyileştirmelerde (Sarı, 2018), endüstriyel yay imalatı yapan bir firmanın kurumsallaşma çalışmalarında (Şaka, 2022), bir devlet hastanesinin dahiliye biriminde hastaların bekleme sürelerini azaltılmasında, yazılım geliştirme projesinde

daha kısa çevrim süreli gelecek durum değer akış haritasını oluşturulmasında (Dağcı ve Aslan 2020) , yalın felsefe ve yalın bakış açısı aracılığı ile yalın montaj sistemlerinin tasarlanmasında (Bora, 2016) başta DAH olmak üzere diğer yalın üretim araçları da kullanılmaktadır. Tablo 1' de yapılan çalışmalarda kullanılan yöntemlere yer verilmiştir.

Tablo 1. Literatür Özeti

Çalışma Adı	KULLANILAN YÖNTEMLER										SEKTÖR		
	VSM	FMEA	SWOT ANALIZI	BAHS	BAYES HARİTALARI	SMED	JIT	KANBAN	TOPSIS	ABC ANALIZI		SPAGETTI DİYAGRAMI	GANT ŞEMASI
Değer Akış Haritalama Yöntemi Kullanılarak Tekstil Sektöründe Yalın Üretim Uygulaması (Bilici ve Kosanoğlu 2021)	X	X											Tekstil
İşletmelerde Kurumsal Dönüşüm Odaklı Proseslerde Yalınlaştırma ve Verimlilik Artırma Projesi (Şaka, 2022)	X		X										Endüstriyel Yay
Değer Akış Haritalama Sürecinde Kriter ve Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Bulanık Karar Verme ve Bir Uygulama (Yılmaz, 2019)	X			X									Katlanır Bomlu Vinç
Otomotiv Endüstrisinde Simülasyon Bütünleşik Değer Akış Haritalama Uygulaması (Kahrıman, 2013)	X												Otomotiv
Değer Akış Haritalarında Belirlenen Darboğazların Çözümü İçin Bayes Ağları ile Senaryo Üretimi: Çamaşır Makinası Fabrikasında Bir Uygulama (Akçaoğlu,2012)	X				X								Beyaz Eşya
Improving Aluminum Cable Manufacturing Process By Implementing Lean Production Tools (Özer, 2022)	X					X	X	X					Alüminyum İletken
Nonconforming Material Flow Analysis Via Value Stream Mapping: A Case Study in Automotive Industry (Biol,2021)	X							X					Otomotiv
Üretim Hattı Tasarımında Değer Akış Haritalama Tekniğinin Kullanılması (Sarı,2018)	X												Üretim Hattı Tasarımı
Değer Akış Haritalama Yöntemi ile Yalın Uygulamalar: Tekstil Sektörü Örneği (Akın,2020)	X												Tekstil
Atölye Tipi Üretim Sistemlerinin Toplam Ekipman Etkinliği, Değer Akış Haritalama ve Matematik Programlama Modeli Kullanılarak Çizelgelenmesi (Gür,2019)	X										X		Rafine Yağ
Endüstriyel Ürün İmalatı Yapan Bir İşletmede Yalın Üretim Uygulaması (Başak, Yılmaz ve Deniz,2019)	X					X	X						Endüstriyel Tank
Yalın Üretim Sisteminde Dijitalleşme ve Endüstri 4.0 Uygulamaları ile Süreç İyileştirme Analizi: Bir İmalat İşletmesinde Uygulama (Gürsoy,2020)	X					X							Otomotiv
Sağlık Sektöründe Yalın Üretim Uygulaması: Tokat İlinde Bir Devlet Hastanesi Örneği (Dağcı ve Aslan,2020)	X												Sağlık
Bir Tekstil İşletmesinde Yalın Altı Sigma ile Süreç İyileştirmeye Yönelik Bir Örnek Olay Çalışması (Çelebi Gürsoy ve Yıldız, 2021).	X						X						Tekstil
Yazılım Proje Geliştirme Sürecinde Değer Odaklı İyileştirme ve Bir Uygulama (Ertek,2020)	X												Yazılım
Yalın Montaj Sistemlerinin Tasarlanması ve Uygulanması (Bora,2016)	X					X	X						Montaj Sistemleri
Bu Çalışma	X					X			X	X			Ayakkabı Yan Sanayi

Bu çalışmada, diğer çalışmalara benzer olarak üretim süresinin kısaltılması ve üretim alanı içerisinde malzeme dolaşımının azaltılması iyileştirmeleri üzerinde durulmuştur. Ayakkabı yan sanayisinde bir DAH çalışmasına rastlanılmamıştır. Ayrıca DAH ile ABC ve Spagetti diyagramlarının da birlikte kullanılması çalışmanın özgünlüğü ortaya koymaktadır.

MATERYAL VE METOT

Yalın üretim, üretim ve tedarik aşamalarında ortaya çıkan tüm gereksiz süreçlerin ortadan kaldırılmasını amaçlamaktadır. Başka bir tanımlamada ise yalın üretim; sistemlerin giderlerinin, zamanının, kullanılan teçhizatın ve iş gücünün daha az kaynak kullanılarak, ürün ve hizmet kalitesinden taviz vermeden üretildiği ve lojistiğinin yapıldığı üretim biçimidir (Kahrıman, 2013).

Yalın üretim olarak bildiğimiz üretim ve yönetim sistemi, 1950’li yıllarda Japon Toyota şirketinde Eiji Toyada ve Taichi Ohno öncülüğünde ortaya çıkmıştır. Eiji Toyada, Henry Ford’un liderliğini yaptığı seri üretim prosesinin birkaç ögesini kullanmanın dışında, Toyota’nın üretim direktörü eğitimi için Amerika Birleşik Devletleri’ne gönderilmiştir. Eiji Toyada bu gezisi sırasında üretim sistemlerini eleştirel bir gözle incelemiş olup, seri üretimden esinlendiği fikirlerini Japonya’ya uygun yeni bir üretim ve yönetim sistemi olarak uygulamaya geçirmiştir (Özer, 2022).

Yalın üretim; ‘en az kaynakla, en kısa zamanda, en az maliyet ve sıfır hata ile, müşteri isteğine tamamen cevap verebilecek şekilde, israfsız bir şekilde ve tüm üretim etkenlerini en esnek biçimde kullanıp, potansiyellerin tamamından fayda sağlayarak nasıl gerçekleştiririz?’ sorusunun bir cevabıdır. Yalın üretim, bu amaçların tamamına aynı anda ulaşılması ilkesine dayanmaktadır. Kısaca genel kabul görmüş tüm şartları ve ilkeleri araştıran, sabit olan hiçbir fikri kesin olarak kabul etmeyen şüpheli bir felsefenin ürünü olarak ortaya çıkmış ve gelişmiştir (Çakır, 2011). Yalın üretim, ürün ve prosese yalın ilkeler uygulandığında başarıya ulaşmaktadır. Yalın üretime geçiş beş adımlı bir prosestir. Yalın üretim ilkeleri Şekil 1’ de verilmiştir ve adımların her biri aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 1. Yalın Üretim İlkeleri (Gürsoy, 2020)

Değer

Yalın fikrinin en önemli ve hassas başlangıç noktası değerdir. Değer; yalnızca müşterinin tanımlamasıyla anlam kazanmaktadır. Değeri açıklayabilmek için firmalar ‘Müşteri bu prosesten ne talep ediyor?’ sorusuna cevap aramalıdır. Değeri oluşturan üretici veya hizmet sağlayıcı, müşterinin istediği kalite, özellikler ve fiyat gibi parametreleri gerçekleştirmelidir. Hizmetin veya ürünün yanlış bir şekilde teslim edilmesi israftır. İsrafin önlenmesi için müşterinin taleplerini iyi anlamak ve birebir gerçekleştirmek gerekmektedir (Aydın, 2009).

Değer Akışı

Yalın felsefe prensiplerinin ikinci adımı ise her adımın değere sahip olduğundan emin olmak için değer akışının açıklanmasıdır. Değer akışı; hammadde tedarikinden başlayarak üretimi tamamlanmış ürünün son kullanıcıya ulaşmasındaki tüm süreçleri içermektedir. Bu süreçler değer yaratan operasyonlar, değer yaratmayan operasyonlar ve değer yaratmayan ama kaçınılmaz operasyonlar olarak adlandırılabilir. Değer akışı, süreç içerisinde yok edilmesi

gereken değer yaratmayan ve değer yaratmayan ama kaçınılmaz operasyonları tespit edilmesini sağlamaktadır. Kısaca değer akışı süreçlerin değer yaratmayan operasyonlardan arındırılma veya bu operasyonları azaltma aşamasıdır (Pekin, 2015).

Sürekli Akış

Değerin tanımlanması ve değer akışı sayesinde israftan kurtulduktan sonra ürünlerimizin üretim süreçlerinde problemsiz ilerlemesini sağlamak gerekmektedir. Sürekli akış, israfın ve darboğazların yok edilmesi, kalitede sifıra yakın fire olmasının ardından ürün veya hizmetin hiçbir aksaklık olmadan müşteriye sürekli bir şekilde aktarılmasını sağlamaktadır (Demirci, 2017).

Çekme Sistemi

Yalın felsefenin çekme prensibi; değeri müşteriye itme yerine ürün veya hizmetin sıradaki müşteri tarafından çekilmesine izin verilmesini savunmaktadır (Kökten, 2021). Bu durum, müşteri herhangi bir ürün veya hizmet istemediği durumlarda üretim yapılmaması anlamına gelmektedir. Çekme ilkesi, son alıcının belirli bir ürünü istemesiyle başlar ve bu süreçler her departmanın kendinden öncekine sipariş geçmesini ister. Yani bilgi akışı sondan başa doğru şeklinde ilerler. Bu prensip uygulanmaya başladığında stok ihtiyacını, talebi karşılamayan ürün veya hizmet üretimi gibi sorunları ortadan kaldırır (Özer, 2022).

Mükemmellik

Yalın felsefede zamanla; değeri tanımlamanın, değer akışı oluşturmanın, sürekli akışı sağlamanın ve müşterilerin firmadan değer çekmesiyle birlikte iş gücü, zaman, alan, maliyet ve fire oranı azaltmanın bir sonu olmadığı fark edilmiştir. Bu durum sonucunda yalın düşüncenin beşinci ilkesi mükemmellik olarak belirlenmiştir. Mükemmellik sonu olmayan bir yolculuktur ve firmalar bu süreçte kendilerini sürekli geliştirmek zorundadırlar (Demirci, 2017).

DAH

DAH, üretim proseslerinde değer yaratan ve değer yaratmayan faaliyetlerin görselleştirilmesini sağlayan yalın üretim yöntemlerinden biridir (Gür, 2019). Toyota Üretim Sistemi (TPS)'ne göre üretimde malzeme ve bilgi akışındaki karışıklık ve hatalardan dolayı değer akışı çalışmaları bu iki akış üzerinde olmaktadır (Akçaoğlu, 2012). DAH'ın amacı malzeme ve bilgi akışındaki değer yaratmayan işlerin en aza indirilmesidir (Uzunovic, 2018). Dolayısıyla işletmeler DAH yöntemini kullanarak süreçlerdeki israfları fark edebilecek ve bu israfları ortadan kaldırarak süreçlerdeki verimliliği arttıracaklardır.

Değer akış haritalama yönteminin uygulanması için ilk olarak ürün grubu seçilmelidir. Üretilen tüm ürünlere DAH yönteminin uygulanması karmaşıklığa yol açacağı için benzer üretim süreçlerini izleyen bir ürün grubu seçilmelidir. Ürün grubu belirlendikten sonra bu ürün grubuna hammadde tedariki bitmiş ürünün müşteriye teslimi arasındaki proses incelenir. Bu prosese ait veriler toplanarak mevcut durum haritası çizilir. Haritada malzeme akışı, bilgi akışı, üretim istasyonları, operatör sayıları, istasyonlara ait çevrim süreleri, kalıp değişim süreleri vb. bilgiler bulunmaktadır. Mevcut durum haritası prostedeki katma değere sahip ve katma değere sahip olmayan operasyonların görülmesine yardımcı olur. Elde edilen bilgiler sayesinde gelecek durum haritası planlanır. Planlanan harita uygulamaya geçirilir. İstenilen durum meydana gelene kadar süreç tekrarlanır (Adalı vd., 2017).

DAH yönteminin uygulanması sırasında kullanılacak ölçütlerin anlamlı bilgiler üretmesi gerekmektedir. Tercih edilen ölçütlerin karar verme sürecinde yöneticilere doğru bilgi vermesi beklenmektedir. Yalın bir değer akışında kullanılan başlıca değerlendirme ölçütleri aşağıdaki gibidir:

- Çevrim süresi(C/T): Bir süreçte art arda üretilen iki sağlam ürünün arasında geçen zamandır. Planlanmayan bir durum oluşmadığı sürece bu süre standarttır. Başka bir deyişle, bir süreçte üretilen parçanın tamamlanma sıklığıdır (Kahrıman Muhammet, 2013).

$$\text{Çevrim süresi} = \frac{\text{Net Üretim Süresi}}{\text{Üretilen Ürün Sayısı}} \quad (1)$$

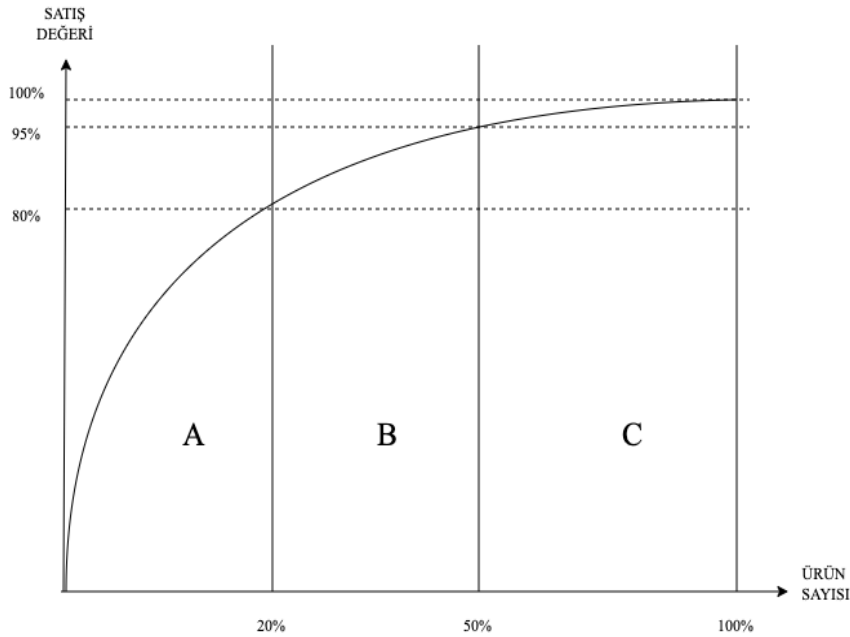
- Takt zamanı: Müşterinin ürün siparişi verme sıklığıdır. Müşterinin taleplerini karşılamak için bir ürünü ne sıklıkla üretme ihtiyacı duyacağımızı gösterir (Kiriş, 2021).

$$\text{Takt zamanı} = \frac{\text{Net Üretim Süresi}}{\text{Müşteri Talebi}} \quad (2)$$

- Akış süresi (L/T): Bir ürünün üretilmesi için gereken süredir. Yani, ürünün başlangıçtan sona ulaşana kadar değer akışında geçirdiği süredir.
- Katma değer süresi (V/A): Ürünün oluşması için hammaddeden itibaren meydana gelen değişimleri gerçekleştirilen işlerin süresidir.
- Katma değeri olmayan süre: Müşterinin istediği ürünün üretilmesi sırasında değer katmayan işlerin toplam süresidir.
- Kullanılabilir çalışma süresi: Vardiyadaki çalışma süresinden mola, toplantı, eğitim, temizlik gibi zamanların düşülmesiyle elde edilen net çalışma süresidir (Çalışkan, 2018).

ABC Analizi

Malzemelerin kategorilere ayrılmasında en sık kullanılan metot olan ABC analizi 1897 yılında İtalyan iktisatçı Wilfredo Pareto tarafından geliştirilmiştir (Dursun ve Gürgen, 2020; Erbaş, 2018). Bu metodun temeli Pareto ilkesi yani 80/20 kuralıdır (Erbaş, 2018). Kısaca ABC analizi malzemelerin %20'sinin etkisinin %80 olduğu düşüncesini savunmaktadır (Dursun ve Gürgen, 2020). Klasik ABC analizi malzemeleri yıllık maddi değer yüzdesi ve yıllık kullanım sayısı oranına göre sınıflandırmaktadır (Işıklı, Özkan ve Ağırbaş, 2019). Pareto ilkesine göre envantere olan farklı malzemeler A, B ve C sınıfları olmak üzere ayrılırlar. 'A' sınıfına ait ürünler sayısal olarak toplam ürünlerin %20 sini kapsarken, maddi değer olarak ise %80'ini kapsamaktadır. 'B' sınıfına mensup ürünler sayısal olarak toplam ürünlerin %20 ile %30' una sahip iken 'C' sınıfına ait ürünler %50 ile %60'ını oluşturur. Maddi değer olarak ise 'B' sınıfında olanlar %15 ile %20'lik dilime sahipken, 'C' sınıfında olanlar ise %5 ile %10 dilimini kapsamaktadır (Kılıç vd., 2014).



Şekil 2. ABC Analizi Grafiği

Spagetti Diyagramı

Spagetti diyagramı, bir proseste hareket ve taşıma için ne kadar zaman, mesafe vb. harcadığını gösteren bir araçtır (Guzel ve Shahbazzpour Asiabi, 2022). Çizim yapılırken çalışanların yaptıkları farklı işler için farklı renklerle işin yapılacağı bölüm çizilir (Yalçın vd., 2018). Hareket ve taşıma için kullanılan yollar çizildiğinde israfı saptamak daha kolay hale gelir (Guzel ve Shahbazzpour Asiabi, 2022). Kısaca diyagramın çizilmesi çalışanın taşıma veya üretim akışı için gerçekleştirdiği hareketin azaltılması, yalınlaştırılmasını hedefler (Yalçın vd., 2018). Ayrıca, mevcut durumu incelemek ve tavsiye edilen iyileştirmeleri karşılaştırmak için faydalı olabilir (Guzel ve Shahbazzpour Asiabi, 2022).

PROBLEM TANIMI VE YÖNTEMİN UYGULANMASI

DAH, çözüm bulan değil çözüme kapı açan bir yöntemdir. Bunu da problemleri tespit etmede kolaylık sağlayarak yapmaktadır. Firmanın genel problemi siparişlere yetişememesi, termin tarihlerine uyamaması ve dolayısıyla müşteri memnuniyetsizliğidir. DAH yöntemi ile mevcut durum haritası oluşturulduğunda ayrıntılı problem tanımları yapılacaktır.

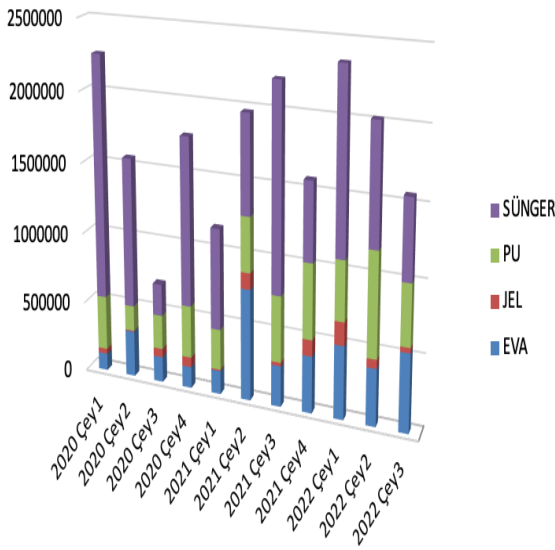
Uygulama Yapılan Üretim Hattı

Uygulama 1999 yılından bugüne kadar faaliyet gösteren, kuruluş amacı ayakkabı yan sanayisine hizmet etmek olan fakat birçok imalat sektörüne (otomotiv, beyaz eşya, medikal, tekstil vb.) de ara ürün üreten bir firmada yapılmıştır. Firma entegre bir tesis olup bünyesinde ihtiyacı olan birçok süreci barındırmaktadır. 18 dönümlük yerleşim alanında 8000 metrekare tek katlı kapalı alanda üretim yapan tesis üretiminin %40'ını ihraç etmektedir.

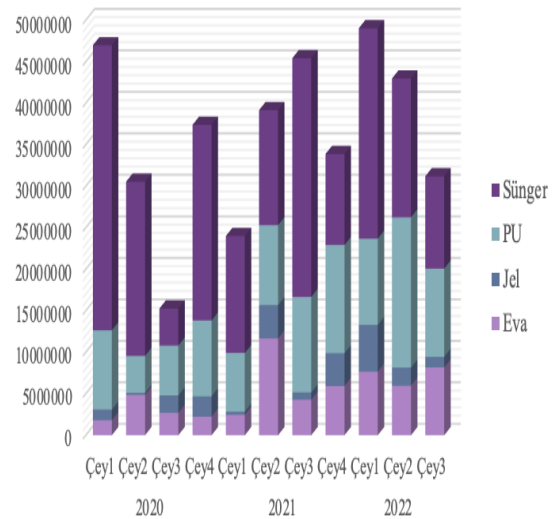
Firmada üretim süreçleri on farklı bölüme ayrılmıştır. Bu bölümlerden kesim, şekillendirme bölümleri olan sıcak-soğuk presleme ve enjeksiyon bölümleri 3 vardiya çalışırken diğer bölümler tek vardiya şeklinde çalışmaktadır. Tek vardiya çalışan bölümler haftada 5 gün ve günde net 9 saat çalışırken, 3 vardiya çalışan bölümler haftada 6 gün ve günde net 7,5 saat çalışmaktadırlar.

Ürün Ailesi Seçimi

Firmada sünger, poliüretan (PU), jel ve eva adı verilen dört ana ürün grubu kullanılarak ayakkabı iç tabanı üretimi yapılmaktadır. Bu ürün grupları üzerinde, firmada 2020 yılının ilk çeyreğinden 2022 yılının üçüncü çeyreğine kadar olan zaman dilimi için siparişlere göre ABC analizi yapılmıştır. Şekil 3'teki ABC analizinde ürün gruplarının yıllara göre sipariş miktarı dağılımı adet olarak verilmiştir. Ayrıca Şekil 4'teki ABC analizinde ürün gruplarının kazançlarına göre dağılımı TL olarak verilmiştir. İki analiz incelendiğinde sünger grubunun diğer ürün gruplarına göre yoğun olarak talep edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 3. Yıllara Göre Sipariş Miktarı Dağılımı (adet)



Şekil 4. Yıllara Göre Kazanç Dağılımı (TL)

Bu analizler DAH için ürün grubu seçilmesi amacı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde ürün grupları içerisinde gelen sipariş adetlerine ve kârlılığa göre sünger ürün grubunda çalışma yapılmasına karar verilmiştir.

Mevcut Durum Analizi

Bu bölümde sünger ürün grubu için DAH çizilmiş ve Şekil 5'te görüldüğü üzere mevcut durum haritası meydana getirilmiştir.

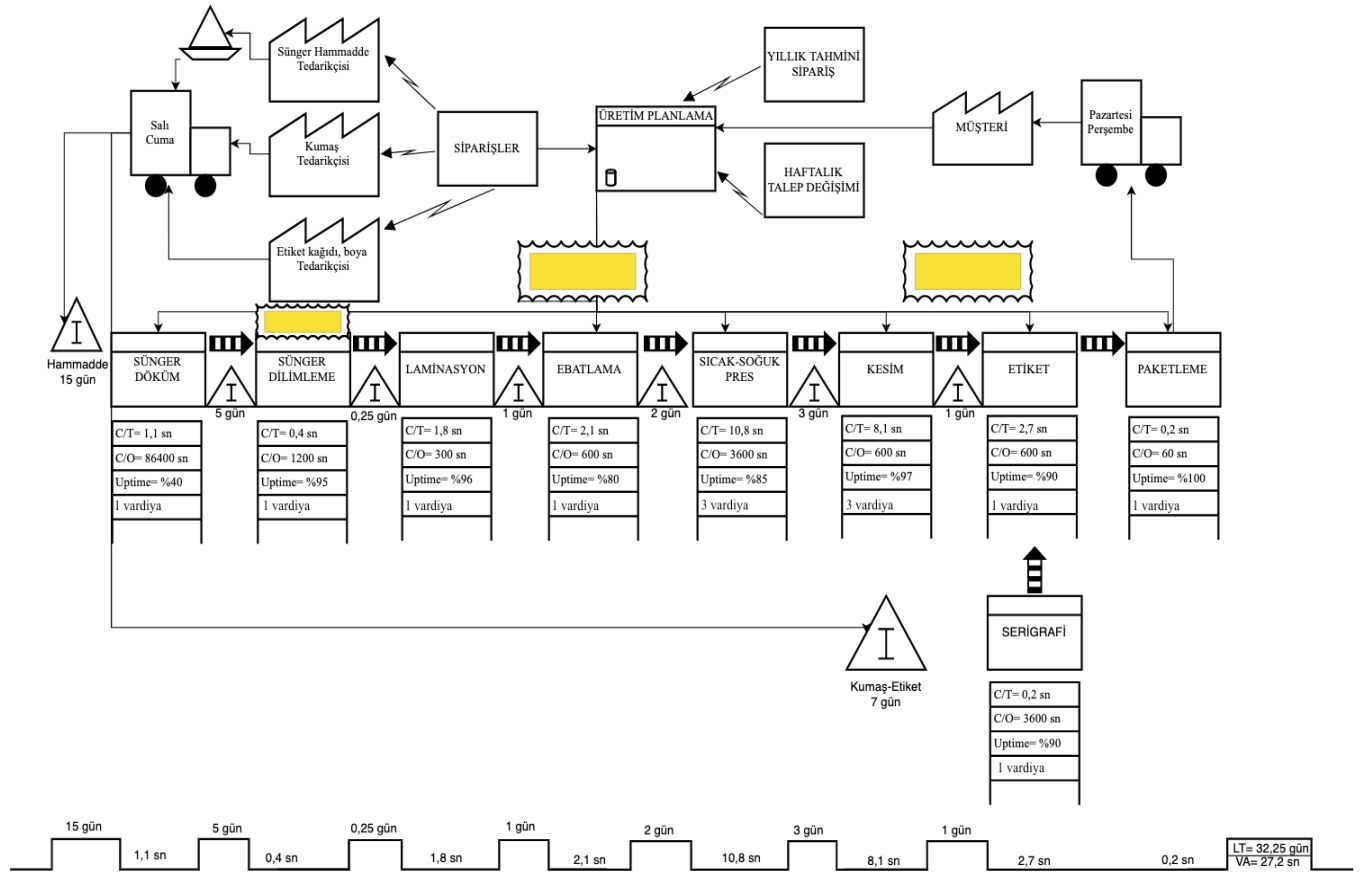
Üretim boyunca problemleri tanımlamak için mevcut durum haritası ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. İncelemelerde bazı terimlere dikkat edilmelidir. Bunlar,

• Müşterinin ürün isteme sıklığı olan takt zamanını bilmek gerekmektedir. Çalışmanın incelendiği toplam 11 çeyrek döneminde günlük ortalama 10000 çift sünger üretimi yapılmaktadır. Bu dikkate alınarak takt zamanı hesaplandığında;

Tek vardiya olan bölümler için (Sünger döküm, sünger dilimleme, laminasyon, ebatlama, etiket, paketleme);

$$\text{Takt Zamanı} = (32400 \text{ saniye} \times 1 \text{ vardiya}) / 10000 \text{ çift} \\ = 3,24 \text{ saniyedir.}$$

$$\text{3 vardiya olan bölümler için (sıcak-soğuk pres, kesim);} \\ \text{Takt Zamanı} = (32400 \text{ saniye} \times 3 \text{ vardiya}) / 10000 \text{ çift} \\ = 9,72 \text{ saniyedir.}$$



Şekil 5. Mevcut Durum Değer Akış Haritası

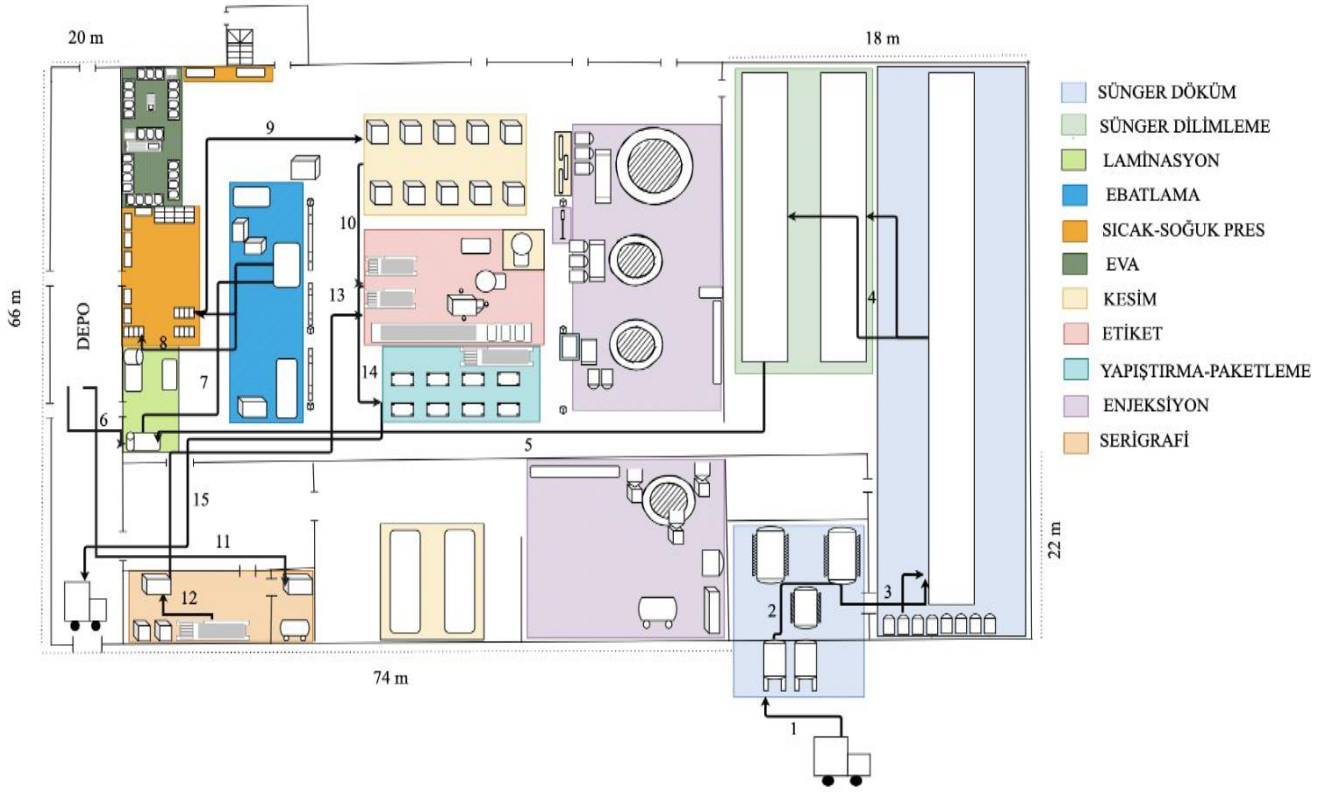
• Sıcak-soğuk pres bölümünde çevrim süreleri hesaplanan takt zamanının üzerinde gözükmektedir. Bu durum akışı bozarak darboğaza neden olmaktadır. Dolayısıyla bu bölümde iyileştirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır.

• Üretim hattı incelenirken birbirinden farklı hatalar göze çarpmıştır. Bu hatalardan dolayı bazı ürünler tekrardan işleme girerek kurtarılabilirken bazıları ikinci el olarak satılabilmektedir. Bu durumda termin süresinin uzaması, daha fazla iş gücü kullanımı, malzeme ve enerji kaybı gibi israflara sebep olmaktadır. Hatalarla ilgili kök neden analizi yapılmalıdır.

• Proses aralarındaki envanter miktarlarının fazla olması dikkat çekmektedir.

• Bakım operasyonlarının yetersizliğinden kaynaklanan beklenmedik arızalarla üretim akışında aksaklıklar meydana gelmektedir. Bakımların planlı yapılması sağlanmalıdır.

• Malzemenin üretim esnasında fabrika içerisinde gereksiz taşındığı görülmektedir. Bu durum hareket israfına yol açmaktadır. Burada iyileştirme yapmak amacıyla Şekil 6'da görüldüğü üzere spaghetti diyagramı çizilmiştir. Buna göre toplam taşıma mesafesinin 262,25 metre olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Mevcut Durum Spagetti Diyagramı

İyileştirme Çalışmaları

Bu bölümde mevcut durum haritasında tespit edilen sorunların çözümüne yönelik adımlar tartışılmıştır.

Sünger Döküm

Sünger döküm işleminde reaksiyonun gerçekleşmesinin ardından ürünün dilimleme işlemine geçilebilmesi için belirli bir süre beklenerek içindeki suyun buharlaşması gerekmektedir. Kapalı bir alanda olan sünger döküm bölümünün ortam sıcaklığını arttırmak için klimalardan yararlanılmıştır. Yazın sıcaklık artırılmasına ihtiyaç duyulmazken, kışın bu enerji güneş panellerinden karşılanmaktadır. Buharlaşmayı etkileyen faktörlerden sadece sıcaklığın 10°C artırılması ile üretim akışı 1 gün kısalmaktadır. Deneysel çalışmalar yapılarak en uygun ortam sıcaklığı tespit edilebilir. Bu sayede üretim akış süresinin daha da kısalaacağı tahmin edilmektedir.

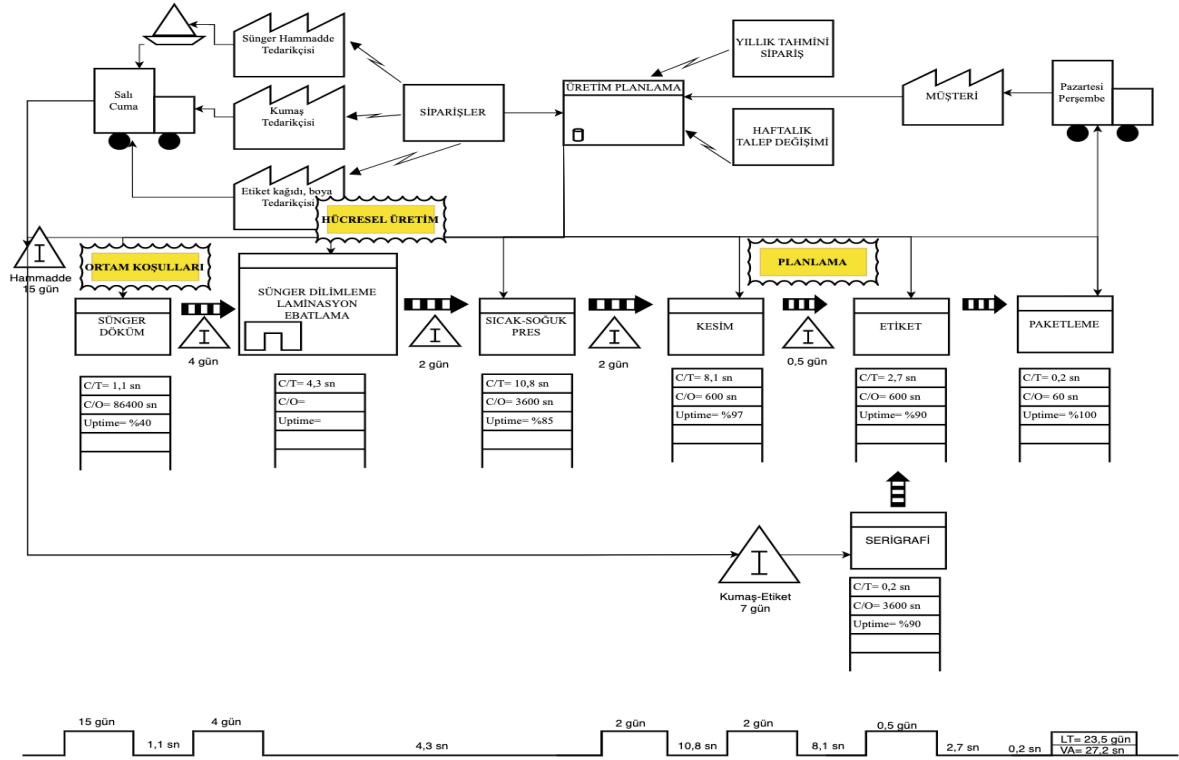
Sünger Dilimleme-Laminasyon-Ebatlama

Çevrim zamanlarının yakın olması hücre tipi üretim uygulamasının uygun olduğunu göstermektedir. Bu bölümlerde hücre tipi üretim uygulamak için makine yerleşimlerinde değişim yapılmıştır. Makine yerleşimi değişikliğinde öncelik hücre tipi uygulama, ardından ürünün en az hareket etmesi şartlarına dikkat edilecek şekilde hücre tasarımı yapılmıştır. Hücresel üretimin uygulanması halinde üretim akışında 1,25 gün kâr edilmektedir. Ayrıca hücresel üretim uygulaması için gereken makine yerleşiminin ardından ürünün yer değişim mesafesi 262,25 metreden 233,8 metreye düşmüştür.

Kesim-Etiket Bölümü Planlama

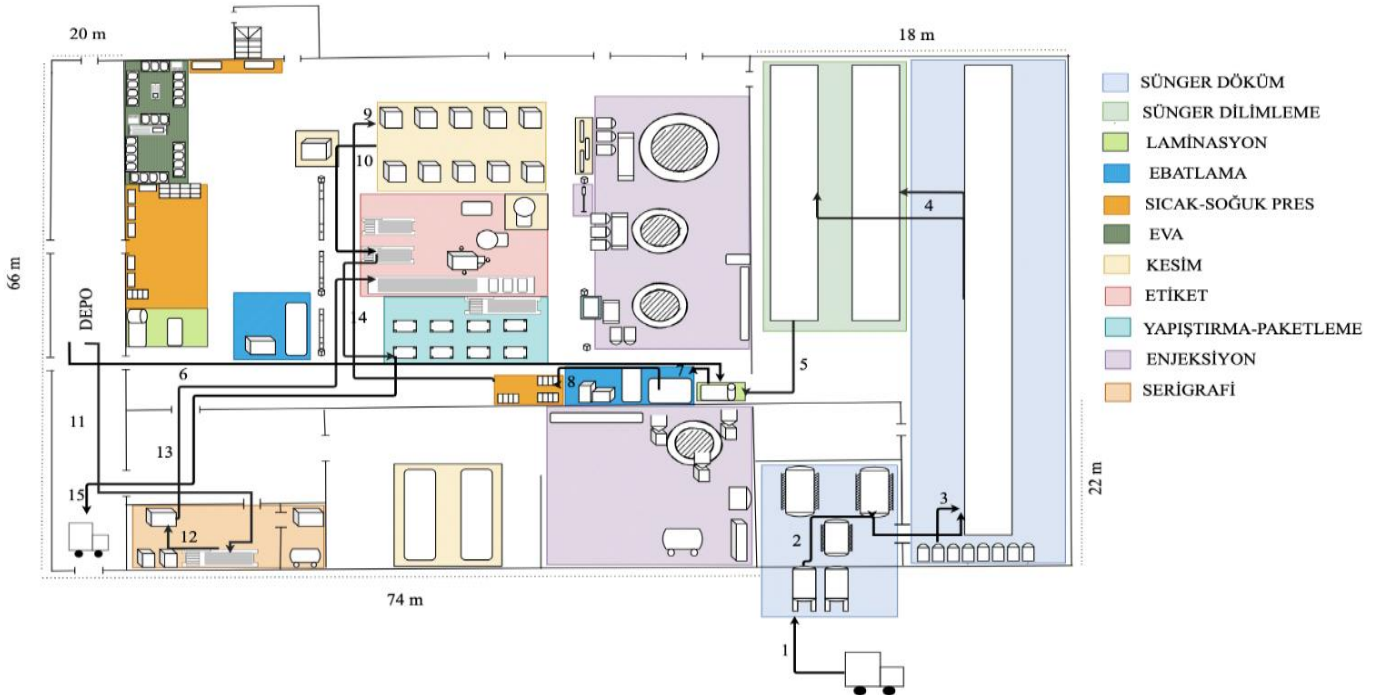
Şirkette üretim planlama ERP sistemiyle yapılmaktadır. Fakat aynı anda dört ürün ailesi birden üretilmektedir. Bu ürün ailelerinin ortak noktası; kesim, etiket ve paketleme bölümlerinde işlem görmeleridir. Üretim planlama birimi farklı günlerde sadece farklı ürün gruplarının işleme gireceği şekilde planlama yapmaktaydı. Bu durumun ürünlerin bekleme süresini uzattığı tespit edilmiştir. Planlama mantığı her ürün grubunun her gün işleme gireceği şekilde değiştirilmiştir. Bu sayede sünger ürün ailesinin üretim akış süresi kısalmıştır. Yapılan yeni planlama sayesinde ara stok miktarı azalmış ve üretim akış zamanı 1,5 gün kısalmıştır.

Bu değişikliklerin yapılması sonucunda ortaya çıkacak olan değer akışı Şekil 7’de gösterilen gelecek durum haritası ile gösterilmektedir.



Şekil 7. Gelecek Durum Değer Akış Haritası

Ayrıca gelecek durumda makine yerleşiminde yapılacak olan düzenleme ile malzeme dolaşımında iyileştirme sağlanmıştır. Bu durum Şekil 8’de gösterilmektedir.



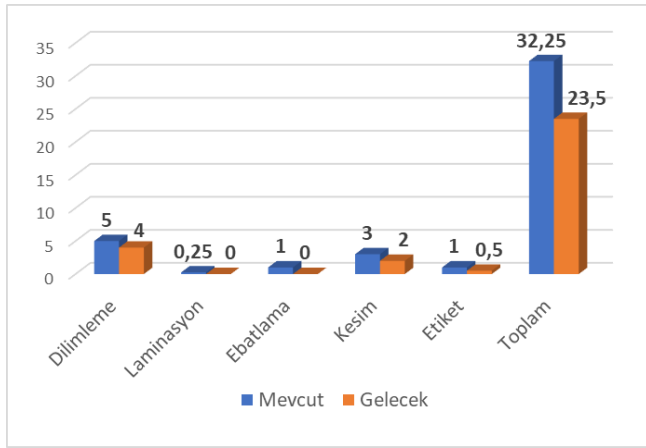
Şekil 8. Gelecek Durum Spagetti Diyagramı

BULGULAR VE TARTIŞMA

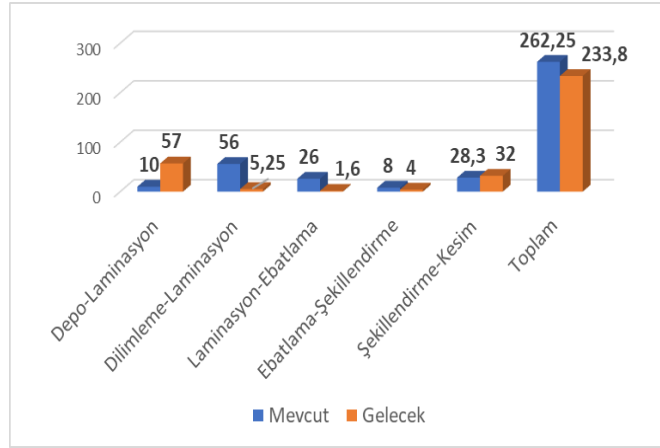
Yalın üretim teknikleri maliyet, kalite ve performans açısından performanslarını iyileştirmeyi hedefleyen firmalar tarafından sık kullanılmaktadır. Bu çalışmanın uygulama kısmı, siparişlerini verilen termin zamanına yetiştirmekte sıkıntı yaşayan, hammadde kayıplarından kaynaklı maliyetleri yüksek olan, üretimde oluşan hatalı ürünler ve yüksek miktardaki envanter gibi problemlere sahip bir firmada yapılmıştır. Yalın üretime geçiş sürecinde israf kaynaklarının belirlenmesinde etkili bir yöntem olan DAH yönteminden yararlanılmıştır. İlk olarak sünger ürün grubuna ait üretim süreci incelenmiş ve mevcut durum değer akış haritası meydana getirilmiştir. Daha sonra israf kaynakları tespit edilerek bu israfların azaltılması için iyileştirme önerilerinde bulunulmuş ve gelecek durum değer akış haritası çizilmiştir.

Örnek vaka çalışmasında ayakkabı yan sanayi sektöründe faaliyet gösteren tesisin üretim süreçlerinde karşılaştığı israf kaynakları saptanmıştır. İyileştirme çalışmalarında işlem süresinin azaltılması, hammadde kaybının azaltılması, yarı mamul stok düzeyinin azaltılması ve makine yerleşiminin daha verimli hale getirilmesi hedeflenmiştir.

İyileştirme çalışmaları sonucunda üretim akış süresinde azalma, zamanında teslim edilemeyen ürün miktarlarında azalma, ara stok miktarlarında azalma, gereksiz hareketin azalması gibi kazançlar elde edilmiştir.



Şekil 9. Değer Akış Haritalama Sonuçları (gün)



Şekil 10. Spagetti Diyagramı Sonuçları (metre)

Uygulamada önerilen iyileştirme çalışmaları sayesinde üretim akışı 32,35 günden 23,5 güne düşürülmüştür. İyileştirme çalışmasında hücre tipi üretim uygulamasının işlevselliğini sağlamak için makine yerleşiminde değişikliklere gidilmiştir. Makine yerleşim planı değişikliği sonucunda depodan laminasyona malzeme taşınması 10 metreden 57 metreye, presten kesim bölümüne yapılan hareket 28,30 metreden 32 metreye çıkarken dilimlemeden laminasyona geçişte 56 metreden 5,25 metreye, laminasyondan ebatlamaya geçişte 26 metreden 1,60 metreye, ebatlamadan sıcak-soğuk pres bölümüne geçerken 8 metreden 4 metreye düşürülmüştür. Diğer bölümler arasında bir değişim olmamıştır. Sonuç olarak toplamda sünger ürün ailesinin üretilmesi için gereken taşınma mesafesi 262,25 metreden 233,8 metreye düşürülmüştür.

SONUÇ

Yalın üretim felsefesinin firmalara uygulanma süreci sonu olmayan bir yolculuk olarak tanımlanabilir. Bu felsefenin odak noktasında bulunan sürekli gelişim mantığı buna neden olmaktadır. Yalın üretime geçişin ilk aşamaları genel sürece bakıldığında firmaları en çok zorlayan kısım olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü yalın üretim firmalarda ve çalışanlarda bir kültür değişimi istemektedir. Bu kültür değişimi hangi düzeyde olursa olsun tüm çalışanların operasyonlara bakış açılarında birlik sağlamaktadır. Bunun da ilk adımı yalın üretim felsefesi kapsamında tanımlanan israf türlerinin tespit edilebilmesidir. İsrafın tespit edilmesiyle birlikte sürekli iyileştirme çarkları dönmeye başlayacaktır.

Firmalarda israfın tespit edilmesi için genellikle ilk uygulana yalın üretim tekniği DAH olmaktadır. DAH, ürünün tedarikinden başlayarak müşteriye gönderilene kadar olan sürece genel bir bakış sağlamaktadır. Bu nedenle DAH, birbirinden farklı birçok sektörde kullanılmaktadır. Bu çalışma siparişe göre üretim yapan bir ayakkabı yan sanayi firmasında gerçekleştirilmiştir.

DAH yöntemi birbirinden farklı birçok sektörde kullanılmasına rağmen bu sektörde ilk defa kullanılmaktadır. Yöntem uygulanmadan önce yöntemin hangi ürün grubuna uygulanacağına karar verilmesi gerekmektedir. Bunun için ABC analizi yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonrasında ise gereksiz hareketlerin ortadan kaldırıldığını ispat edebilmek için spagetti diyagramları hazırlanmıştır. Literatürde DAH yöntemiyle birlikte ABC analizi ve spagetti diyagramının bir arada kullanıldığı çalışmalara rastlanılmamıştır. Hem sektör farklılığı hem de farklı üç yöntemin bir arada kullanılması açısından çalışma literatüre katkı sağlamakta ve DAH yöntemini uygulamak isteyen benzer sektörler için örnek teşkil etmektedir.

Çalışma sonucunda üretim akış süresi düşürülmüş ve ürünün gereksiz hareketi ortadan kaldırılmıştır. İlerleyen çalışmalarda sünger döküm bölümündeki sıcaklık değerlerinde yapılacak bir deney tasarımı çalışması ile uygun parametrelerin ayarlanabileceği ve burada malzemenin geçirdiği sürenin daha da kısılacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca meydana gelen kalite hatalarında durumun firma tarafından kabullenildiği ve hatalı ürünlerin ikinci kalite olarak piyasaya sunulduğu görülmektedir. Kalite sorunları ile ilgili kök-neden analizlerinin firmaya katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adalı, M. R., Kiraz, A., Akyüz, U., & Halk, B. (2017). Yalın Üretime Geçiş Sürecinde Değer Akışı Haritalama Tekniğinin Kullanılması: Büyük Ölçekli Bir Traktör İşletmesinde Uygulama. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 1–1. Retrieved from <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.283787>
- Akçaoğlu, Ö. (2012). Değer Akış Haritalarında Belirlenen Darboğazların Çözümü İçin Bayes Ağları ile Senaryo Üretimi: Çamaşır Makinası Fabrikasında Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Akın, N. G. (2020). Değer Akış Haritalama Yöntemi ile Yalın Uygulamalar: Tekstil Sektörü Örneği. *Uluslararası Ekonomi İşletme ve Politika Dergisi*, 4 (2), 477-492. Retrieved from doi: 10.29216/ueip.787227
- Aydın, H. (2009). Yalın Üretim Sistemi, Değer Akış Haritalama Yöntemi ve Yalın Üretim Sisteminin Çalışanlara Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İstanbul 268s.
- Başak, E. E., Yılmaz, İ. S. & Deniz, N. (2019). Endüstriyel Ürün İmalatı Yapan Bir İşletmede Yalın Üretim Uygulaması. *Endüstri Mühendisliği*, 30 (3), 157-172. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhendisligi/issue/50398/604852>
- Bilici, S., & Kosanoğlu F. (2021). Değer Akış Haritalama Yöntemi Kullanılarak Tekstil Sektöründe Yalın Üretim Uygulaması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences* (Vol 33). Retrieved from <https://doi.org/10.7240/jeps.784530>
- Biol, N. G. (2021). Nonconforming Material Flow Analysis via Value Stream Mapping: A Case Study in Automotive Industry. Master Thesis. Dokuz Eylül University Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir 71s.
- Bora, E. (2016). Yalın Montaj Sistemlerinin Tasarlanması ve Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Çakır, E. (2011). Yalın Altı Sigma ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İzmir 213s.
- Çalışkan, Z. (2018). Su Armatürü Üretiminde Değer Akış Haritalama Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İzmir 111s.
- Çelebi Gürsoy, G., & Yıldız, M. S. (2021). Bir Tekstil İşletmesinde Yalın Altı Sigma ile Süreç İyileştirmeye Yönelik Bir Örnek Olay Çalışması. *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 13(2), 1553–1573. Retrieved from <https://doi.org/10.20491/isarder.2021.1215>
- Dağcı, A. & Aslan, E. (2020). Sağlık Sektöründe Yalın Üretim Uygulaması: Tokat İlinde Bir Devlet Hastanesi Örneği. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 23 (4), 623-638. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/hacettepesid/issue/58128/837844>

- Demirci, Ö. (2017). Tekstil Sektöründe Değer Akış Haritalama ve MTM-UAS Metotlarının Uygulamalı Kombinasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa 63s.
- Dursun, E., & Gürgen, E. (2020). Konteyner Terminal Stok Yönetiminde ABC Analizi ve Bulanık Sınıflandırma. *Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(46), 563–583.
- Emir, O., & Gergin, Z. (2021). Yalın Sistem Tasarımı İçin Simülasyon Destekli Değer Akış Haritalama Uygulaması. *Journal of Industrial Engineering*, 32(1), 108–126. Retrieved from <https://orcid.org/0000-0003-4512-0519>
- Erbaş, M. A. (2018). Bir Bakım Onarım Organizasyonunda Stok Yönetimi Optimizasyonu ve Bakım Planlaması ile Entegre Edilmesi Üzerine Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İstanbul 76s.
- Ertek, E. (2020). Yazılım Proje Geliştirme Sürecinde Değer Odaklı İyileştirme ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 49s.
- Gür, T. (2019). Atölye Tipi Üretim Sistemlerinin Toplam Ekipman Etkinliği, Değer Akış Haritalama ve Matematik Programlama Modeli Kullanılarak Çizelgelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana 79s.
- Gürsoy, Ö. (2020). Yalın Üretim Sisteminde Dijitalleşme ve Endüstri 4.0 Uygulamaları ile Süreç İyileştirme Analizi: Bir İmalat İşletmesinde Uygulama. Doktora Tezi. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, Aydın 377s.
- Guzel, D., & Shahbazpour Asiabi, A. (2022). Increasing Productivity of Furniture Factory with Lean Manufacturing Techniques (Case Study). *Tehnički Glasnik*, 16(1), 82–92. Retrieved from <https://doi.org/10.31803/tg-20211010121240>
- Işıkçelik, F., Özkan, O., & Ağırbaş, İ. (2019). Hastane İlaç Stoklarının ABC, VED ve ABC-VED Yöntemleri ile Analizi. *Hacettepe Sağlık İdaresi Dergisi*, 22(2), 305–318. Retrieved from <https://orcid.org/0000-0002-7975-4141https://orcid.org/0000-0001-9491-8696>
- Kahırman Muhammet. (2013). Otomotiv Endüstrisinde Simülasyon Bütünleşik Değer Akış Haritalama Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri 96s.
- Kılıç, A., Aygün, S., Aydın Keskin, G., & Baynal, K. (2014). A Variant Perspective to Multi Criteria ABC Analysis Problem: Fuzzy Analytic Hierarchy Process - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 20(5), 179–188. Retrieved from [https://doi.org/10.5505/pajes.2014.18894\[a1\]](https://doi.org/10.5505/pajes.2014.18894[a1])
- Kiriş, M. (2021). Değer Akış Haritalama ve Bir Üretim İşletmesinde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Toplam Kalite Yönetimi Anabilim Dalı, İzmir 96s.
- Kökten, E. S. (2021). Değer Akış Haritalama Yöntemi ile İşletmelerde Üretim Kayıplarının Azaltılması: Ahşap Sektöründe Bir Uygulama. Doktora Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, Karabük 108s.
- Özer, P. S. (2022). Improving Aluminum Cable Manufacturing Process by Implementing Production Tools. Yüksek Lisans Tezi. Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana 91s.
- Pekin, E. (2015). Kauçuk Endüstrisinde Bir Yalın Üretim Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya 205s.
- Sarı, E.B. (2018). Üretim Hattı Tasarımında Değer Akış Haritalama Tekniğinin Kullanılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* (Vol 56). Bilgin Sarı, E. (2018). Üretim Hattı Tasarımında Değer Akış Haritalama Tekniğinin Kullanılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (56), 67-81. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dpusbe/issue/36761/370934>
- Şaka, M. (2022). İşletmelerde Kurumsal Dönüşüm Odaklı Proseslerde Yalınlaştırma ve Verimlilik Artırma Projesi. Yüksek Lisans Tezi. Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

Tuzcu, E. U. (2019). Application of Lean Manufacturing Methods to a Marble Factory. Master Thesis. University of Warwick.

Uzunovic, Z. F. (2018). Değer Akış Haritalama ve Bir Üretim İşletmesinde Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, İzmir.

Yalçın, M., Elyas, C., Yıldız, S., Alpşen, C., & Yalçın, G. (2018). Yalın Metodolojinin Hastane Laboratuvar Süreçlerinin İyileştirilmesinde Kullanılması (Toyota Üretim Sistemi- Spaghetti Diyagramı). *Konuralp Tıp Dergisi*, 99–104. Retrieved from <https://doi.org/10.18521/ktd.336102>

Yılmaz, A. (2019.) Değer Akış Haritalama Sürecinde Kriter ve Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Bulanık Karar Verme ve Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.06.2023
Kabul Tarihi : 23.10.2023

Received Date : 22.06.2023
Accepted Date : 23.10.2023

PARÇALI GÖLGELENME DURUMUNDA YAPAY SİNİR AĞLARI VE PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU TABANLI BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMASI

A MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHM BASED ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORK AND PARTICLE SWARM OPTIMIZATION IN PARTIAL SHADING

Elif BALDAN^{1*} (ORCID: 0009-0007-1248-4064)

Hüseyin ERİŞTİ¹ (ORCID: 0000-0003-1474-9170)

¹ Mersin Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mersin, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Elif BALDAN, ebaldan@mersin.edu.tr

ÖZET

Fotovoltaik (photovoltaic - PV) sistemlerde maksimum güç noktası takibi (MGNT) yapılırken gerçek koşullarda parçalı gölgeleme durumu oluşmaktadır. Bu makalede parçalı gölgeleme koşullarını incelemek için MATLAB/Simulink'te PV paneller ve yükseltici dönüştürücüden oluşan bir PV sistem oluşturulmuştur. Geleneksel ve yapay zeka tabanlı MGNT algoritmaları bu sistem üzerinde uygulanmıştır. Maksimum güç noktasını (MGN) takip etmek için geleneksel yöntem olan Değiştir ve Gözle algoritması ve Yapay Sinir Ağları (YSA) tekniği kullanılmıştır. Klasik YSA tekniğinin yanısıra Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile hibrit bir teknik oluşturulmuştur. Farklı senaryolar ile ilk olarak parçalı gölgeleme durumu simülasyon olarak oluşturulmuştur. Algoritmaların doğruluğunu desteklemek için hem güneşli hem de bulutlu olmak üzere iki güne ait gerçek zamanlı ışınım verileri toplanarak MATLAB/Simulink'te oluşturulan PV sistemde analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda PSO tabanlı YSA tekniği diğer algoritmalara göre daha verimli bir şekilde MGN'yi izlediği gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile parçalı gölgeleme durumunda MGNT üzerine yapılan çalışmalara katkı sağlanmaktadır ve yapay zeka algoritmalarının farklı bir alan olan PV sistemler için kullanımı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik panel, değiştir ve gözle metodu, parçalı gölgeleme, yapay sinir ağları, parçacık sürü optimizasyonu

ABSTRACT

In photovoltaic (PV) systems, partial shading occurs under real conditions when maximum power point tracking (MPPT) is performed. In this paper, a PV system consisting of PV panels and a boost converter is created in MATLAB/Simulink to investigate the partial shadowing conditions. Conventional and artificial intelligence-based MGNT algorithms are applied to this system. In order to track the maximum power point (MPP), the traditional method of the Perturb and Observe algorithm and Artificial Neural Networks (ANN) technique are used. In addition to the classical ANN technique, a hybrid technique was created with Particle Swarm Optimization (PSO). First, the partial shading situation was simulated with different scenarios. To support the accuracy of the algorithms, real-time irradiance data for two days, both sunny and cloudy, were collected and analyzed in MATLAB/Simulink on the PV system. As a result of the analysis, it was observed that the PSO-based ANN technique tracks MPP more efficiently than other algorithms. This study contributes to the studies on MGNT in the case of partial shading and demonstrates the use of artificial intelligence algorithms for PV systems, which is a different field.

Keywords: Photovoltaic panel, perturb and observe, partial shading, artificial neural network, particle swarm optimization

ToCite: BALDAN, E., & ERİŞTİ, H., (2023). PARÇALI GÖLGELENME DURUMUNDA YAPAY SİNİR AĞLARI VE PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU TABANLI BİR MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİ ALGORİTMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 895-908.

GİRİŞ

Enerjiye olan ihtiyaç, toplum nüfusunun ve hayat gereksiniminin artmasıyla gittikçe artmaktadır. Hayati bir unsur haline gelen elektrik enerjisi üretiminde çoğunlukla fosil yakıtlar kullanılmaktaydı. Fakat yenilenme hızı tüketim hızından daha yavaş olduğu için fosil yakıtlar hızla azalmaktadır. Kullanıldığı zaman ortaya çıkan sera gazı nedeniyle hava kirliliğine ve küresel ısınmaya yol açması gibi yan etkiler yeni enerji üretme arayışları doğurmuştur. Bu açıdan güneş enerjisi yenilenebilir, temiz ve sınırsız olması gibi avantajlar sağladığı için son dönemlerde gözde hale gelmiştir (Farah vd., 2020). Fotovoltaik (photovoltaic-PV) panellerden elektrik üretiminin en önemli dezavantajı ışınım ve sıcaklığın gün içinde değişmesine neden olan çevresel koşullardır. Bulutlanma veya sis koşulları ışınımı en çok etkileyen etkidir. Bu yüzden PV yapılardan optimum veya maksimum güç üretiminin sağlanılmak istenmesi kaçınılmaz bir durumdur. PV panel yapısında tepe gücü doğrusal bir şekilde tek bir noktada alınamamaktadır (Sai vd., 2023). Maksimum güç noktası takibi (MGNT) algoritmaları tepe gücünü izleyip çalışma noktasını ayarlayarak güç çıkışı en üst seviyeye çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu sayede panel uyumsuzluğunu ve kısmi gölgelenme durumunu gidererek sistemin verimliliğine katkıda bulunmaktadır (Ahmed vd., 2023). Bu noktada maksimum güç noktasına (MGN) ulaşabilmek için birçok algoritma geliştirilmiştir.

Geleneksel algoritma ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Mittal vd., 2020). Ancak geleneksel MGNT algoritmaları parçalı gölgelenme durumunda maksimum noktayı bulmada zorlanmaktadır (Javed & Ishaque, 2022). Dolayısıyla sürü tabanlı başta olmak üzere çeşitli yapay zeka tabanlı MGNT algoritmaları literatürde yer almaktadır. Bollipo vd. (2021) literatürde yer alan PV sistemlere uygulanmış MGNT tekniklerinin genel bir incelemesini ve çeşitli donanımlara ait güncel yayınları sunmaktadır. Benzer derleme çalışmaları da bulunmaktadır (örn: Wasim vd., 2022; Elbarbary & Alranini, 2021; Mao vd., 2020).

PV panelden elde edilen enerjiyi en optimum noktada tutmak için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi çeşitli algoritmalar kullanılmıştır: PSO ile ilgili birçok MGNT çalışmaları bulunmaktadır (Miyatake vd., 2007). Orijinal PSO'nun yanısıra performansı iyileştirmek için farklı yapılar da geliştirilmiştir. Li vd. (2019) parçalı gölgelenme altında MGNT için PSO algoritmasına dayalı yeni bir genel dağıtım MGNT algoritması önermiştir. Priyadarshi vd. (2020) uyarlanabilir bir nöro-bulanık çıkarım sistemi-PSO dayalı MGNT algoritması ile sıfır salınımlı ve maksimum çıkış gücüne ulaşabilmişlerdir. Obukhov vd. (2020) PV sistemi göz önünde bulundurarak PSO algoritması ile dönüştürücü modelinin parametrelerini oluşturmaya çalışmışlardır. Diğer bir çalışmada ise farklı çevresel koşullar altında PV sistemden elde edilen gücün MGN'ye ulaşmak için daha iyi bir performansa sahip olan değiştirilmiş-PSO geliştirmişlerdir (İbrahim vd., 2020). Pragallapati vd. (2017) yaptıkları uyarlanabilir PSO algoritması ile dinamik ve statik performans incelemesi yapmıştır. Uyarlanabilir yapısı sayesinde parametreler hesaplanarak MGN'ye ulaşma süresi ve güç verimi iyileştirilmiştir. Majeed vd. (2023) ise yaptığı çalışmada dinamik gölgelenme koşulları altında iki geleneksel MGNT algoritması ve PSO'ya dayalı MGNT algoritmasının karşılaştırması yapılmıştır. Diğer bir çalışmada ise kısmi gölgelenme durumunda PSO'ya dayalı MGNT algoritması ile çalışma uzunluğu dağılımı yapılmıştır. Ayrıca PSO algoritmasını parametreleri iyileştirilerek uyarlanabilir PSO algoritmasını geliştirmişlerdir (Javed & Ishaque 2022).

YSA ile ilgili yapılan çalışmalarda ise Bouselham vd. (2016) yaptıkları çalışmada farklı MGNT karşılaştırmaları sunmuşlardır. YSA ile yapılan tekniğin verimliliğinin daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Farklı dönüştürücü yapılarında YSA tekniğine dayalı MGNT algoritması ile kısmi gölgelenme koşullarında performans analizleri yapılmıştır (Divyasharon vd., 2019). Diğer bir çalışmada ise YSA tekniği ile oluşturulan MGNT algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma diğer algoritmalarla karşılaştırılarak hız verimlilik açısından daha iyi bir performansa ve daha az karmaşıklığa sahip olduğu gözlemlenmiştir (Zhang vd., 2019). YSA ile ilgili farklı olarak hibrit çalışmalar yapılmıştır. Fathi ve Parian (2021) üç farklı algoritmaya dayalı YSA ile hibrit yöntemler üzerine karşılaştırma yapmıştır. Benzer bir çalışmada ise önerilen hibrit yöntem ile parçalı gölgelenme durumunda çeşitli senaryolarla verimlilik amacıyla testler gerçekleştirmişlerdir Hashim vd. (2021) YSA ile hibrit olan diğer bir çalışmada ise Rahman ve Islam (2020) PSO ile YSA tekniğini birleştirerek doğru bir başlangıç konumu ile MGN'yi bulmayı hızlandırmışlardır. Diğer bir çalışmada ise PSO algoritmasına dayalı YSA tekniği ile verimlilik çalışması yapılarak MGN'nin doğru bir şekilde takip ettiği gözlemlenmiştir (Al-Majidi vd., 2020). Birçok çalışmada PSO'ya dayalı veya YSA'ya dayalı MGNT algoritmalarının çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu algoritmalar geleneksel algoritmalara göre verimli sonuçlar elde etse dahi hibrit olarak oluşturulan algoritmaların daha verimli sonuçlar ortaya koyduğu gözlemlenmiştir.

Yukarıdaki bahsedilen literatürden yola çıkarak PV sistemde parçalı gölgelenme durumunda verim düştüğü için MGNT'nin sağlanmasının zorlandığı açıkça anlaşılmaktadır. Bu açıdan literatürde geniş bir arama yüzeyi

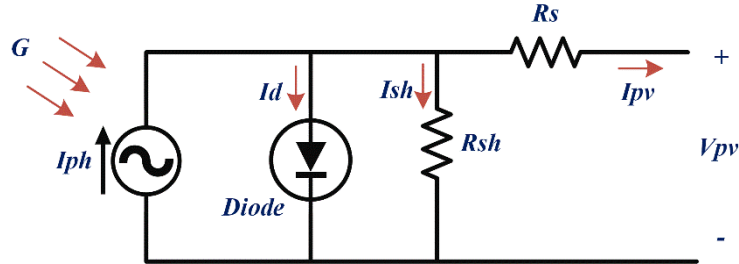
oluşturulmalıdır. Farklı algoritmalar ile düşen verimin artırılması ve MGNT'nin sağlıklı bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Bu makale ile geleneksel yöntem olan Değiştir ve Gözle(D&G) algoritmasının yanısıra YSA ve PSO-YSA tabanlı MGNT algoritmalarının parçalı gölgelenme durumundaki davranışı ve başarı oranları incelenmiştir. İki paralel iki seri olmak üzere oluşturulan PV sistemden MGN'ye ulaşması için her bir algoritma yapısı sisteme entegre edilmiştir Böylelikle bu çalışma ile PV sistemlerde yapay zeka algoritmalarının kullanımı konusundaki çalışmalara katkı sağlandığına inanılmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde sistemin genel yapısı ve çalışmada uygulanan algoritmalar anlatılmıştır.

Fotovoltaik Sistem Modeli

Güneş enerjisinden elektrik üretimi için temel bileşen PV hücreleridir. Şekil 1'de bir PV güneş hücresinin eşdeğer devresi ve Eşitlik 1'de genel PV denklemi verilmiştir.

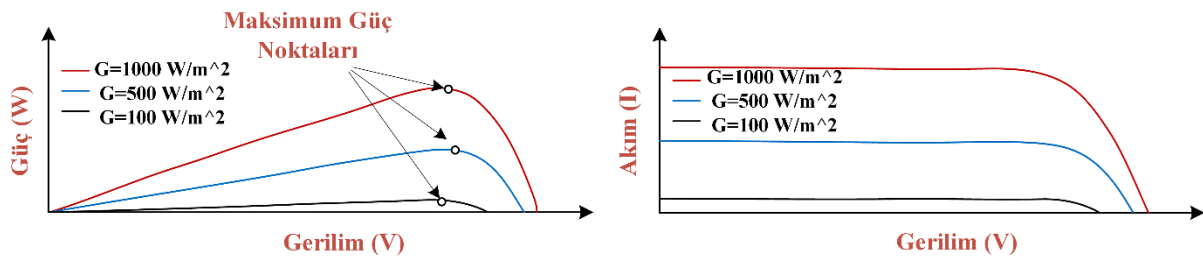


Şekil 1. PV Hücresinin Eşdeğer Devresi

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{AKTN_s} - 1 \right) \right] - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

Burada; I_{pv} PV akımı, V_{pv} PV voltajıdır. I_{ph} ışıktan üretilen akım, I_0 diyot ters doyma akımı, A diyot idealite faktörü, R_s seri direnç, R_{sh} şönt direnç, q elektron yükü, N_s seri bağlı güneş pili sayısı, N_p paralel bağlı güneş pili sayısı, T mutlak sıcaklık derecesi ve K ise Boltzmann sabitidir (İbrahim vd., 2020).

PV hücrelerinin seri veya paralel bağlantılarıyla oluşan PV dizilerinin çıktı özellikleri doğrusal değildir ve zamanla değişmektedir (bkz: Şekil 2). Güç üretimi kısmi gölgelenme veya tozlanma gibi çevresel koşullardan etkilenmektedir.



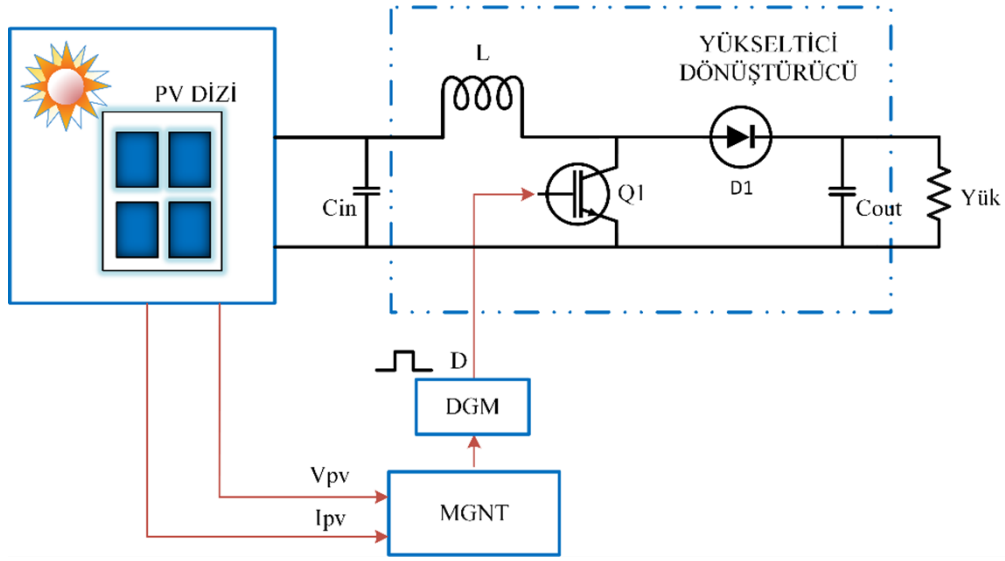
Şekil 2. Farklı Işınlarda PV Paneye Ait IV ve PV Karakteristik Eğrileri

Yükseltici Dönüştürücü

DA-DA dönüştürücüler PV sistem ile tüketiciler arasında bağlantıyı sağlar. Yükseltici dönüştürücünün kullanım alanı giriş geriliminden daha yüksek gerilim gerektiren uygulamalardır. Giriş gücünün en verimli şekilde çıkış gücüne dönüştürülmesi ana prensiptir. Şekil 3'te yükseltici dönüştürücünün eşdeğer devresi verilmiştir (Rastogi vd., 2022;İbrahim vd., 2020).

D görev oranı arttıkça çıkış gerilimi de artar.

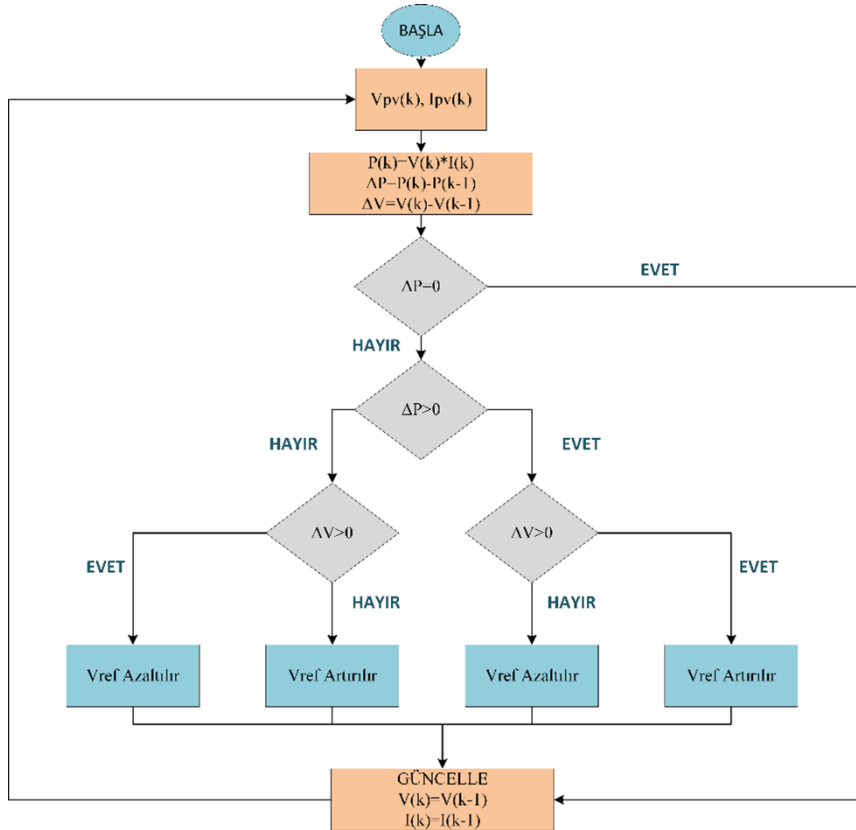
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1-D)} \quad (2)$$



Şekil 3. Yükseltici Dönüştürücü Bağlı PV Panel Sistemi

D&G Algoritması

D&G algoritması uygulamalarda ve laboratuvar çalışmalarında geleneksel MGNT algoritmaları arasında en yaygın kullanılan yöntemdir. MGN'ye ulaşabilmek için PV panelin gerilim ve akım değerleri ölçülür. Gerilim ve güç değerlerine göre görev döngüsünün değişimi belirlenir. Şekil 4'te verilen akış şemasından da görüldüğü üzere ΔP_{pv} ve ΔV_{pv} 'nin değerleri değiştirilip gözlemlenir. ΔP_{pv} değeri sıfır olduğu zaman MGN'ye ulaşılmış olunur (Mountassir vd., 2022; Sarvi ve Azadian, 2022).

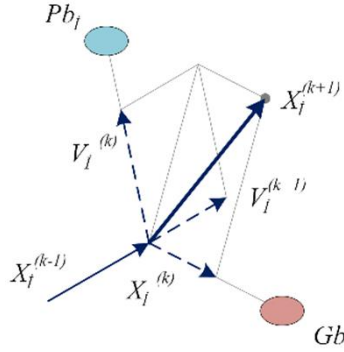


Şekil 4. D&G Algoritması Akış Şeması

Yalnız D&G algoritmasının temel sorunu, MGN'ye ulaşırken sürekli olarak maksimum nokta etrafında salınım yapması ve parçalı gölgeleme durumunda etkili bir şekilde maksimum güce ulaşamamasıdır. D&G algoritmasının bu durumundan dolayı farklı algoritmalarla yönelimler başlanmıştır.

PSO Tabanlı MGNT Algoritması

PSO, kuşlar balıklar gibi bir sürünün hareketlerini temel alan bir optimizasyon algoritmasıdır. Sürüdeki canlıların doğal davranışına dayanarak her bir parçacığın pozisyonuna göre her alanın aday çözümünü bulmak için çalışır. Şekil 5'te görüldüğü üzere her parçacık adımında, komşu en iyi ve küresel en iyi parçacık bilgisinden yararlanarak en iyi çözümü bulabilmek için parçacıkları bir çözüm kümesine atar. En iyi performansa sahip olan parçacık bilgisine göre istenen çözüme ulaşana kadar her iterasyonda ona yaklaşır.



Şekil 5. PSO Algoritması İçin Arama Uzayında Parçacıkların Hareketi

PSO algoritması adımları kısaca aşağıda verilmiştir.

- Arama çözüm kümesinin olasılık değerine göre seçilen rastgele bir parçacık değeri içinde başlatılır.
- Aynı çözüm kümesinde olan eski ve yeni en iyi uygunluk değerleri (P_{li} , P_{bi}) ile karşılaştırma yapılır.
- En iyi ve küresel en iyi konumlar (G_b) karşılaştırılarak küresel uygunluk değeri bulunur. Bu işlemler esnasında kullanılan konumlar, Eşitlik 3 ve 4'te verilmiştir. Diğer iterasyon için uyarlanıp kaydedilir.

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + r1c1(P_{bi} - X_i^k) + r2c2(G_b - X_i^k) \quad (3)$$

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^k \quad (4)$$

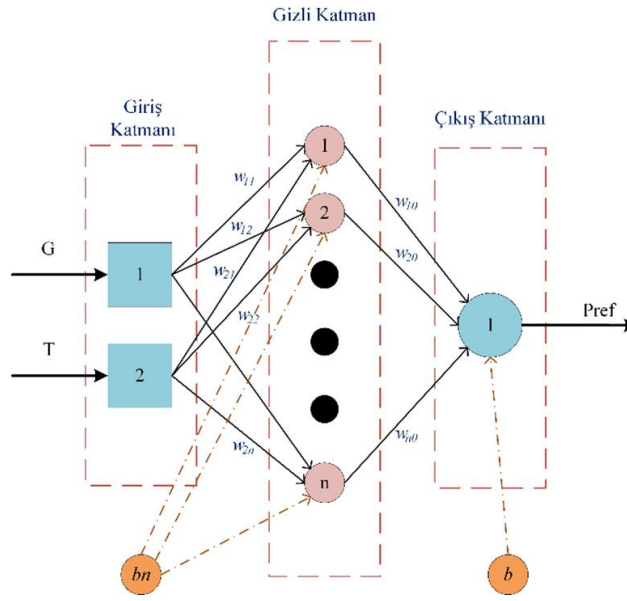
Denklemlerde X_i her parçacığın konumu, V_i arama kümesinin hızı, i optimizasyon vektörü, k yineleme sayısı, w hızın atalet ağırlık faktörü, $c1$ tek parçacıkların bilişsel katsayısı, $c2$ parçacıkların sosyal katsayısı, $r1$ ve $r2$ ise arama kümesinin sıfır ile maksimum hız arasında olan rastgele hız değeridir.

- Uygunluk bakımından en iyi parçacık bulunur. Parçacık hareket konumlarını geliştirebilmek için her iterasyonda not edilir (Al-Majidi vd., 2020).

YSA Tabanlı MGNT Algoritması

YSA insan beyninin bilgi işleme kapasitesinin işlevinden türetilen bir tekniktir. Çeşitli katmanlardan oluşan bir sinir ağı matematiksel olarak modellenir. Sinir hücrelerinin yapısı üç bölümden oluşmaktadır. Dentritler yardımıyla sinyaller hücreye aktarılır. Hücre çekirdeğine ulaşan sinyaller işlemden geçtikten sonra işlenmiş sinyal akson yardımıyla diğer sinir hücresine iletilir. Bu bilgi işleme işlemi Sinir Ağı'nın temel çalışma prensibidir. Bu nedenle YSA tekniği MGNT algoritmasında yaygın olarak kullanılmaktadır.

YSA girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı olmak üzere üç katmandan oluşmaktadır (Şekil 6). Gizli katman bir veya daha fazla katman içerebilir. Bir katmanda yer alan her bir birleşim, diğer katmanda bulunan her birleşimle ilişkilendirilerek sonraki adımda aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Son işlem olarak çıktı alınır.



Şekil 6. YSA Tekniği Blok Diyagramı

Genel yapı kısaca şu şekilde açıklanmaktadır:

- Girdi ve çıktı değişkenleri belirlenir.
- Özel koşullar varsa dikkate alınarak sistem tipine göre veriler üretilir.
- Girdi, gizli ve çıktı katmanlarından oluşan çok katmanlı ileri beslemeli ağ yapısını seçilir.
- Son adım olan eğitim ise oldukça önemli ve hassasiyet gerektiren bir aşamasıdır (Sarvi ve Azadian, 2022).

Matematiksel olarak sistem şu şekilde tanımlanır:

$$y = \sum_{i=1}^n w_{ij} x_j + b_j \quad (5)$$

Burada x_j giriş eğitim noktası, w_{ij} gizli katman düğümleriyle alakalı olan bağlantı ağırlıkları, b_j gizli ve çıkış katmanı arasındaki bağlantının eşik değeri ve n ise giriş sinyallerinin sayısı olarak tanımlanmaktadır. Geri yayılım algoritması kullanılarak ileri beslemeli YSA sisteminin süreci öğrenilir. Her bir düğümün ağırlıkları ve eşik değeri değiştirilerek gerçek çıktı değerlerine yakın bir değer bulunmaya çalışılır. Gradyan algoritması ile bu yaklaşım sağlanarak YSA'nın performansı artırılır. Maliyet fonksiyonu olarak seçilen ortalama karesel hata (mean square error - MSE) şu şekilde tanımlanır:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [Y_j(i) - T_j(i)]^2 \quad (6)$$

Burada, $Y_j(i)$ gerçek çıkış, $T_j(i)$ hedef çıkış, n giriş sinyal sayısı ve m ise çıkış sinyal sayısıdır.

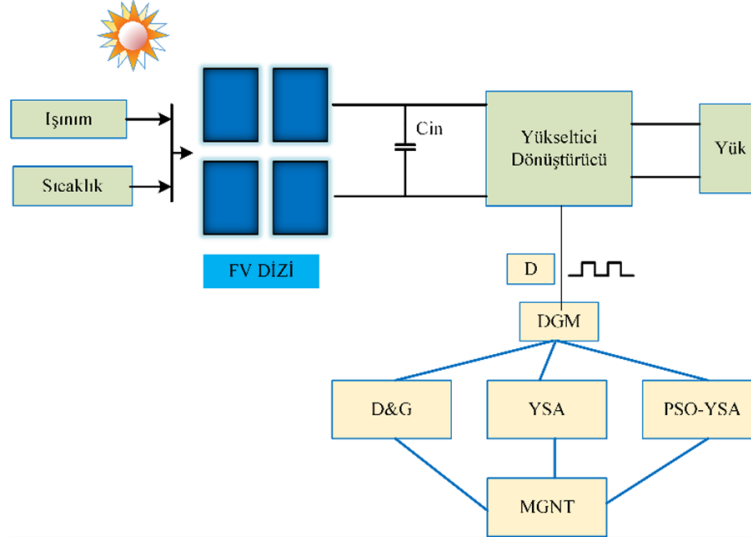
Gizli katmanları belirlemek çok önemlidir. Çünkü gizli katmanda çok fazla birim olursa çözüm uzun sürer ve aşırı uygun regresyon gerçekleşir. Çok az birim olduğu takdirde ise çözüm süresi kısa olup doğrusal bir regresyona neden olur. İkisi de istenmeyen durumlar olduğu için gizli katmandaki birimler uygun bir şekilde belirlenmelidir. Deneme yanılma yaygın bir yöntem olmasına rağmen gizli katman boyutuna ulaşmakta uzun zaman harcadığından yetersiz bulunmaktadır. Geri yayılım algoritmasının kullanım amacı ileri beslemeli YSA modelinin sürecini öğrenmek içindir.

$$w_{ji}^l(t) = w_{ji}^l(t-1) + \Delta w_{ji}^l(t) \quad (7)$$

Burada $w_{ji}^l(t)$ sonraki, $w_{ji}^l(t-1)$ önceki varsayılan eğitim ağırlıkları olarak tanımlanır. Eşitlik 6. ve 7. ile MSE 'yi hesaplamak için geriye bir adım ve yeni çözümü üretmek için ileri adım geri yayılım algoritmasını oluşturur. Eğitim ağırlıkları optimal seviyede olana kadar bu işlem tekrarlanır (Al-Majidi vd., 2020).

Tasarlanan PV Sistem Genel Yapısı

Şekil 7’de parçalı gölgeleme koşulları altında performans analizi için tasarlanan PV sistemi gösterilmiştir. D&G, YSA ve PSO-YSA tabanlı MGNT yöntemleri PV sistemine uygulanmıştır. Bu çalışmada kullanılmak için oluşturulan sistemde iki seri iki paralel olmak üzere dört adet PV panel ve yükseltici dönüştürücü bulunmaktadır. Sistem çıkışında bir yük direnci kullanılmıştır. Üç farklı MGNT algoritması için inceleme yapılmıştır.



Şekil 7. Tasarlanan PV Sistem Genel Yapısı

PV sistemin parametreleri ve yükseltici dönüştürücü devresinin değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem Parametreleri

Parametre	Değer
Maksimum Güç	852 W
Maksimum Güçteki Gerilim (V_{mpp})	58 V
Maksimum Güçteki Akım (I_{mpp})	14,7 A
Açık Devre Gerilimi (V_{oc})	72,6 V
Kısa Devre Akımı (I_{sc})	15,68 A
Paralel Dizi	2
Her Diziye Bağlı Seri Bağlı Modül	2
Yükseltici Dönüştürücü Çıkış Kapasitör (C_{out})	45,5 μ F
Yükseltici Dönüştürücü Yük Direnci (R)	188 Ω
Yükseltici Dönüştürücü Endüktansı (L)	33 mH
Yükseltici Dönüştürücü Giriş Kapasitör (C_{in})	45,5 μ F

Bu çalışmada MATLAB/Simulink ortamında bir PV panel sistemi oluşturulmuştur. Bununla birlikte parçalı gölgeleme durumu için oluşturulan senaryolarda ışınım verileri hem simulasyon ortamında hemde güneşli ve bulutlu olmak üzere iki güne ait deneysel veriler ile farklı hava koşullarında elde edilerek analizler gerçekleştirilmiştir.

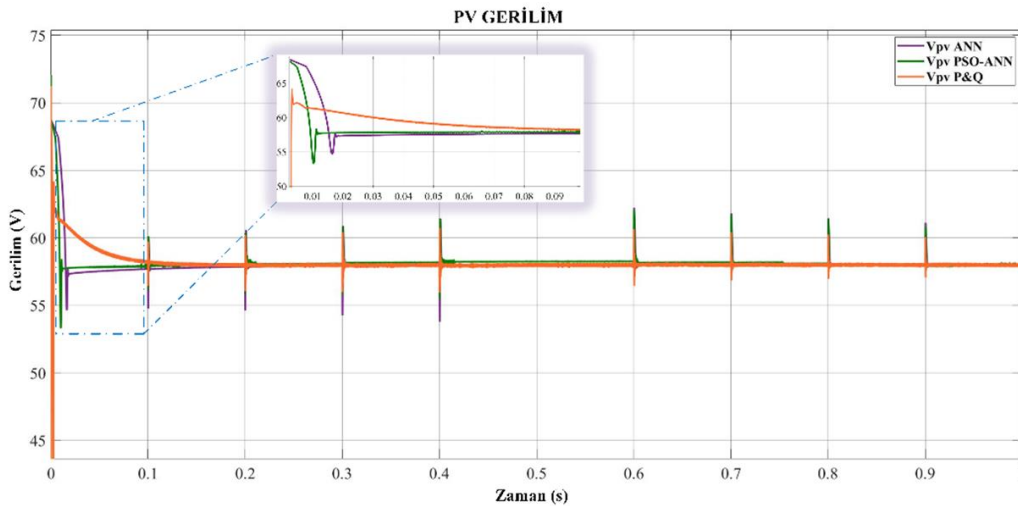
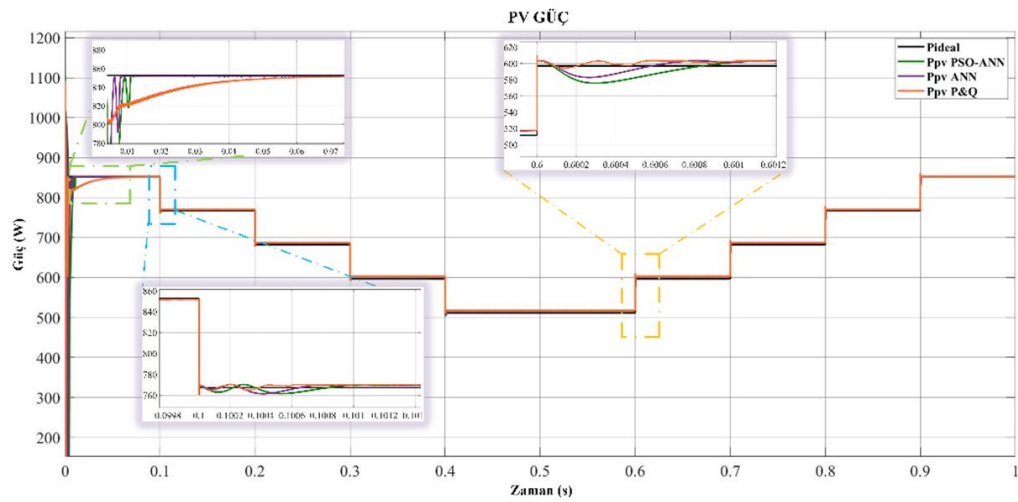
BULGULAR VE TARTIŞMA

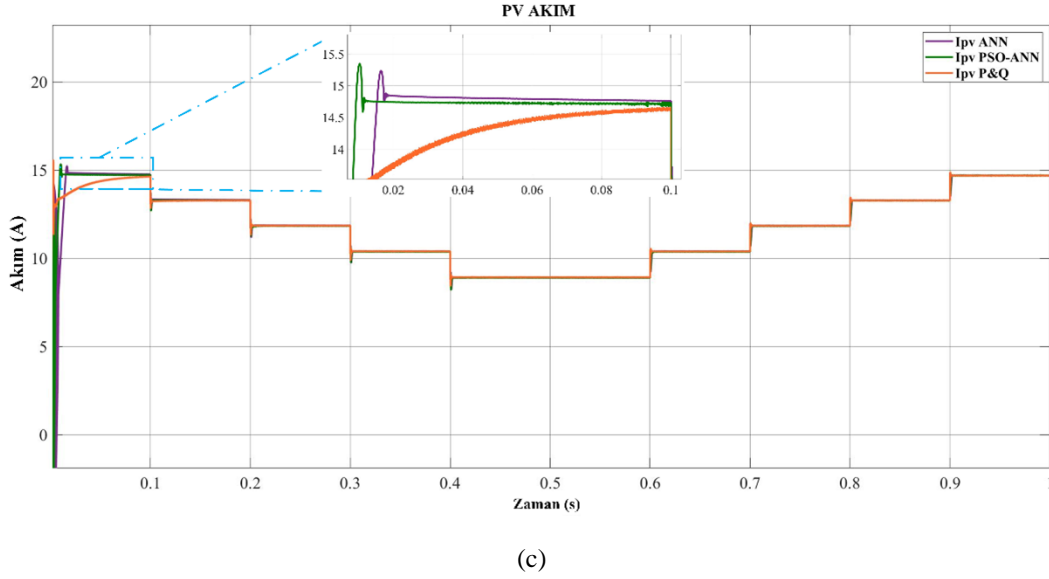
Analizler için 3 farklı senaryo oluşturulmuştur.

Senaryo 1

İlk senaryoda parçalı gölgeleme durumu oluşturulmak istenmiştir. MATLAB/Simulink’te parçalı gölgeleme için oluşturulan ışınım verisi 0.1 saniyeden 0.4 saniyeye kadar 1000 W/m²’den 600 W/m²’ye kadar adım adım düşürülmüş sonrasında 0.6 saniyeden 1 saniyeye kadar ise 600 W/m²’den 1000 W/m²’ye kadar adım adım çıkartılmıştır (Şekil 8). Hava sıcaklığı (T) ise 25°C sabit tutulmuştur. Şekil 9’da elde edilen grafikte yakınlaştırılmış bölümlere bakıldığında YSA ve PSO-YSA tabanlı MGNT algoritması geleneksel yöntemle göre daha uygun bir şekilde MGN’yi sağlamaktadır. 1000 W/m² ışınımında PV sistemin maksimum gerilimi yaklaşık 58 V, maksimum akımı ise 14.7 A civarlarındadır. Şekil 9b’de 0.013 s ile PSO-YSA, 0.018 s ile YSA ve 0.09 s ile D&G algoritmalarının oturma zamanları gözükmemektedir. Işınımın azaldığı ve yükseldiği bölgeler incelendiğinde ise D&G algoritması diğer iki

MGNT algoritmalarına göre daha salınımlıdır. Genel yapıya bakıldığında zaman incelenen her algoritma MGN'yi izleyebilmektedir. Verim hesabı sonucunda PSO-YSA algoritması %99.721, YSA algoritması %99.696 ve D&G algoritması %98.442 verimle MGN'yi izlemektedir.

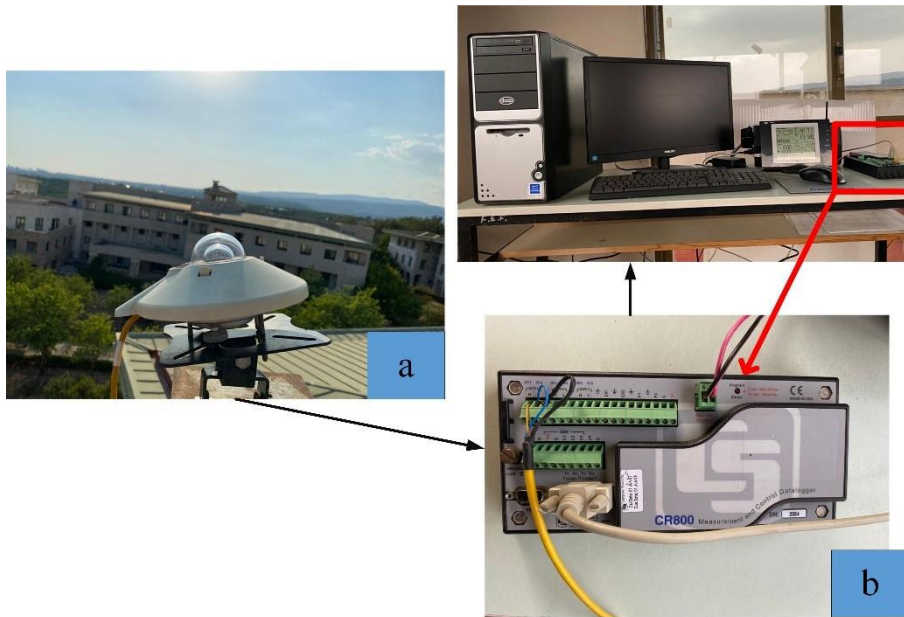




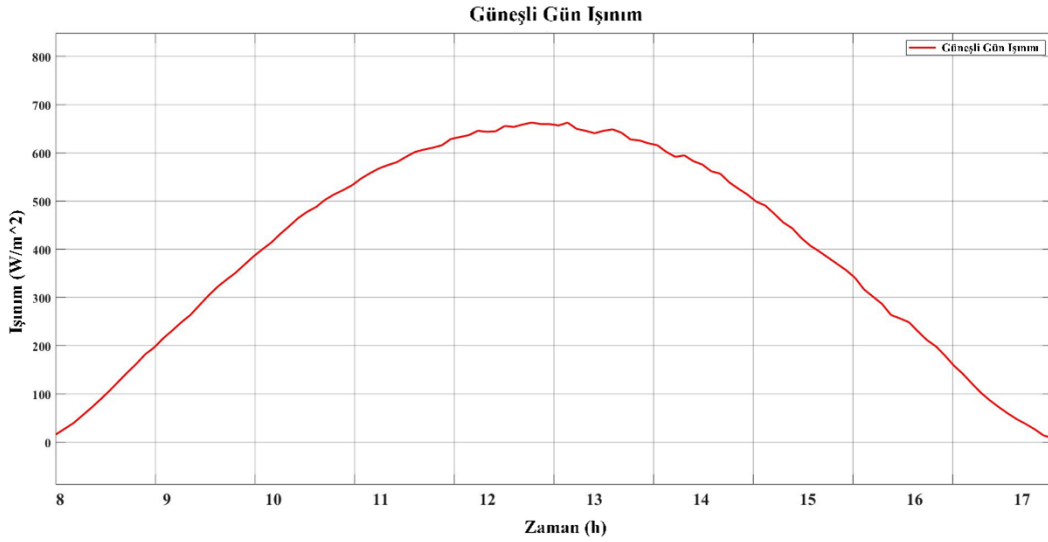
Şekil 9. Senaryo 1'e Ait Gölgeleme Durumu Altında a. PV Güç b. PV Gerilim c. PV Akım

Senaryo 2

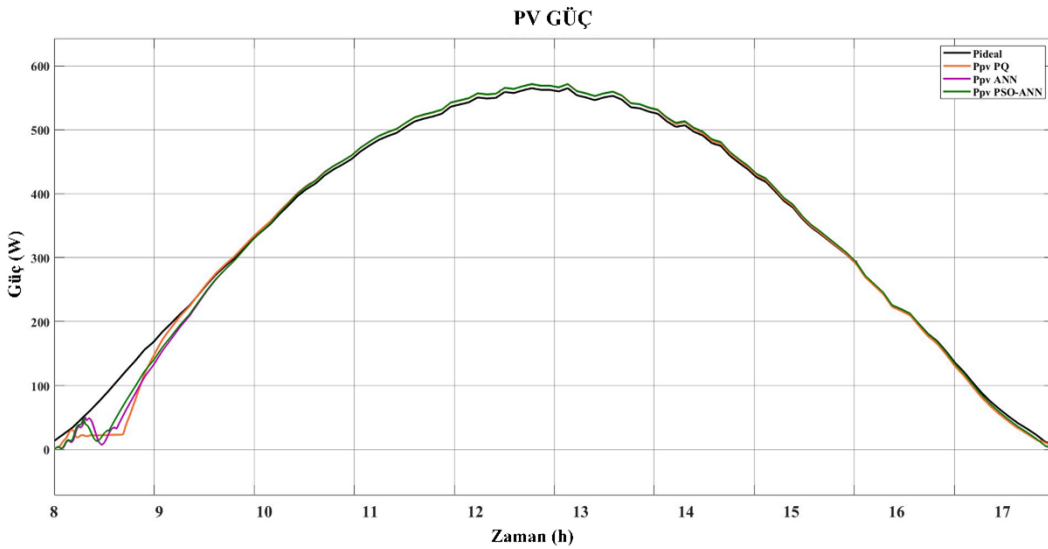
İkinci senaryoda farklı çevresel koşullar altında inceleme yapmak amacıyla güneşli bir gün seçilmiştir. 24 Aralık 2022 tarihinde 08:10 ve 17:20 saatleri arasında güneşli gün için Mersin Üniversitesi Mühendislik fakültesinde bulunan pironometreden (Şekil 10a, CMP11, Kipp&Zonen, Hollanda) gelen gerçek zamanlı ışınım verileri veri kaydedicisi (Şekil 10b, CR800 Series, Campbell Scientific, ABD) yardımıyla alınmıştır. Şekil 11'de güneşli güne ait ışınım verisi gösterilmektedir. Sadece ışınım verisinin MGN'yi izlemesi üzerine etkisinin incelenmesi istendiğinden sıcaklık 25°C'de sabit tutulmuştur. Alınan güneşli gün ışınım verileri oluşturulan PV sisteme ışınım olarak girilerek yukarıda verilen MGNT algoritmaları uygulanmıştır. Şekil 12'de görüldüğü üzere sabah saatlerinde güneşten gelen ışınım miktarı az olduğu için algoritmaların geçici durumdan kararlı duruma geçme durumu oluşmaktadır. Güneşli gün için ışınım miktarı ani olarak değişmediğinden uygulanan üç algoritma da düzgün bir şekilde maksimum güç noktasını izleyebilmiştir. PSO-YSA algoritması %99.547, YSA algoritması %99.166 ve D&G algoritması %94.356 verimle MGN'yi takip etmektedir.



Şekil 10. a. Pironometre b. Veri Kaydedici



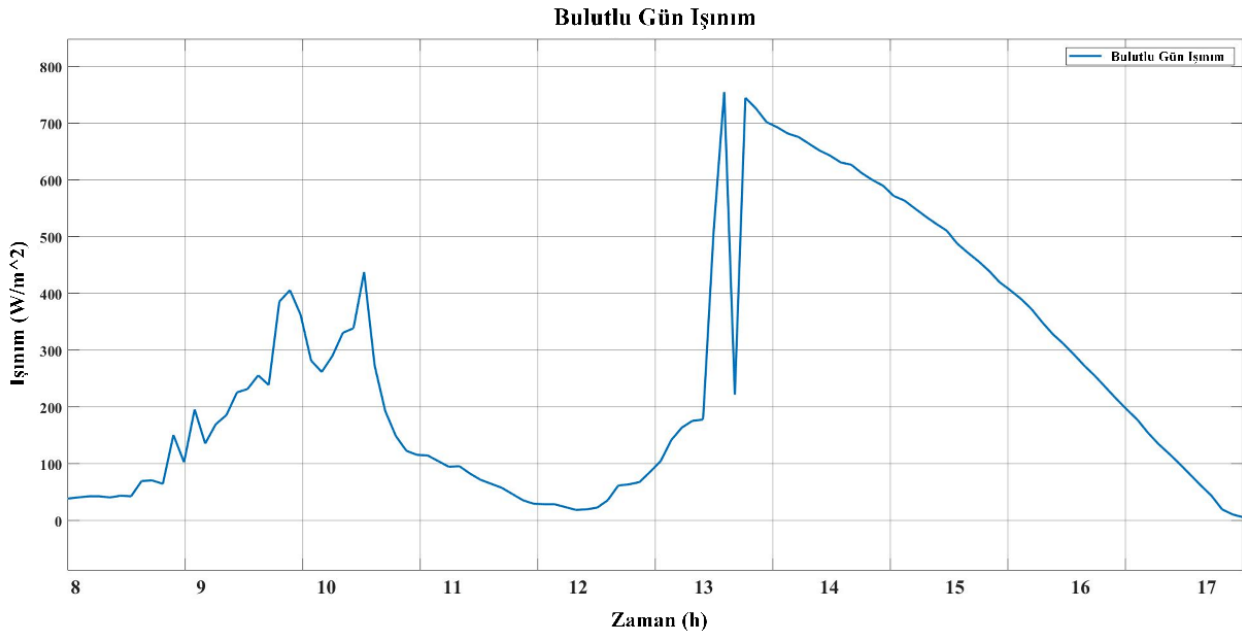
Şekil 11. Güneşli Gün İçin Işınım Değerleri



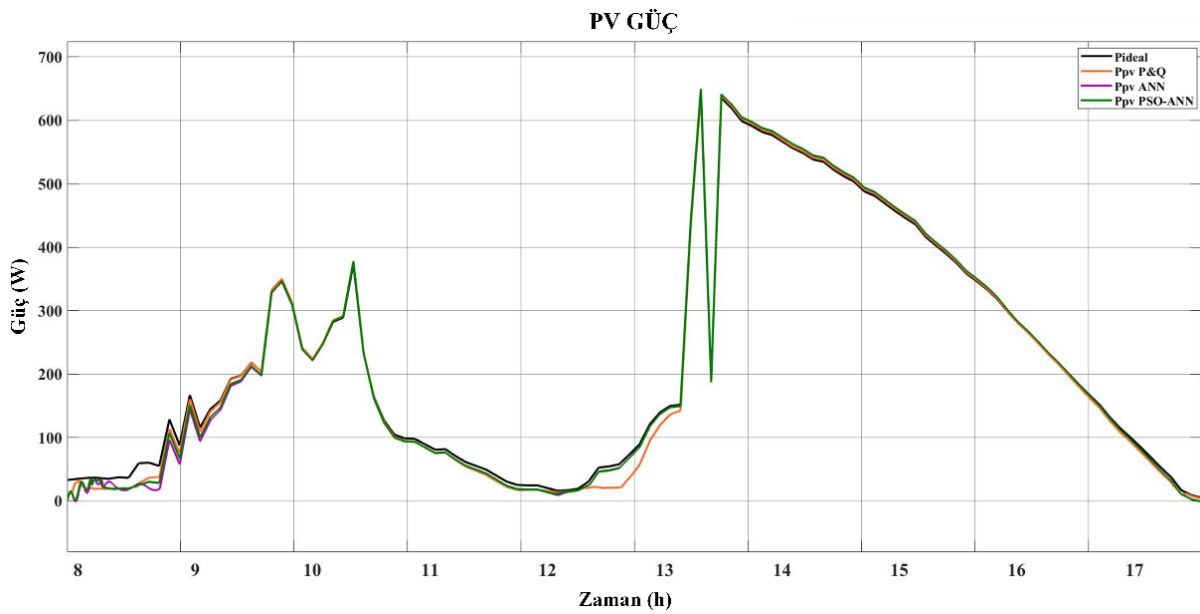
Şekil 12. Güneşli Gün İçin PV Güç

Senaryo 3

Üçüncü senaryoda farklı çevresel koşullarda bulutlu gün için analizler yapılmıştır. Bulutlu gün için 22 Aralık 2022 tarihinde 08:10 ve 17:20 saatleri arasında bir önceki senaryoda belirtilen düzenekten gerçek zamanlı ışınım verileri alınmıştır. Şekil 13'te bulutlu gün için elde edilen ışınım verilerine bakıldığında parçalı gölgelenme durumunun gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Tasarlanan PV sisteme bulutlu gün için diğer senaryolarda olduğu gibi MGNT algoritmaları uygulanmıştır. Ani ışınım değişimleri nedeniyle güneşli gün için elde edilen sonuçlar kadar iyi bir sonuç elde edilememiştir. Öğlen saatlerinde paneller üzerine gelen bulutlar nedeniyle ışınım miktarı düşmektedir. Işınımın düşmesiyle Şekil 14'te görüldüğü gibi geleneksel D&G algoritması MGN'den uzaklaşmıştır. Fakat ışınımın ani olarak yükselmesiyle tekrardan MGN'yi takibe devam etmiştir. YSA ve PSO-YSA tabanlı MGNT algoritması ise sabah saatlerinde geçici durumdan kararlı duruma geçtikten sonra MGN'yi takip ettiği gözlemlenmiştir. Gölgeleme durumu dikkate alındığında güneşli güne göre bulutlu günde verimin azaldığı görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. PSO-YSA algoritması %94.934, YSA algoritması %94.922 ve D&G algoritması %94.522 verimle MGN'yi takip etmektedir.



Şekil 13. Bulutlu Gün İçin Işınm Değerleri



Şekil 14. Bulutlu Gün İçin PV Güç

Performans Karşılaştırması

Bu bölümde verim analizi üzerine karşılaştırmalara yer verilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 2’de önerilen hibrit yapının verim bakımından diğer algoritmalara göre daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Ibrahim vd., (2020)’nin yaptığı çalışmada modifiye PSO algoritması kullanılmıştır. Simülasyon ortamında farklı gölgelenme koşulları oluşturulup verim analizleri yapılmıştır. Aşağıda verilen Tablo 2’de bu gölgelenme koşullarından bir tanesi seçilerek bu makalede önerilen yöntemin karşılaştırılması yapıldığında PSO-YSA algoritmasının daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Al-Majidi vd., (2020)’nin yaptığı çalışmada güneşli ve bulutlu iki gün için performans analizleri yapılmıştır. Güneşli gün verimleri senaryo 2 ile karşılaştırıldığında verimlerin birbirine oldukça yakın ve benzer olduğu görülmektedir. Bulutlu gün için inceleme yapıldığında ise gölgelenme sürelerinin farklı olması nedeniyle ışınm değerindeki dalgalanmalar oldukça farklıdır. Bu yüzden koşulların aynı olmadığı göz önüne alındığında verim açısından değerlerin farklı olmasının oldukça normal bir durum olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Performans Analizi Karşılaştırma

	MGNT Algoritmaları	Verim
Senaryo 1	PSO-YSA	%99,72
	YSA	%99,696
	D&G	%98,442
Senaryo 2	PSO-YSA	%99,547
	YSA	%99,166
	D&G	%94,356
Senaryo 3	PSO-YSA	%94,934
	YSA	%94,922
	D&G	%93,522
Kaynak (Ibrahim vd., 2020)	Modifiye PSO	%96,160
	YSA	%79,076
Kaynak (Al-Majidi vd., 2020) Güneşli gün	PSO-YSA	%99,68
	YSA	%99,17
	D&G	%98,18
Kaynak (Al-Majidi vd., 2020) Bulutlu gün	PSO-YSA	%99,30
	YSA	%97,43
	D&G	%88,21

SONUÇ

Bu çalışmada parçalı gölgelenme durumu altında geleneksel ve yapay zeka optimizasyonuna dayalı YSA ile MGNT üzerine analizler yapılmıştır. PV panellere bir yükseltici dönüştürücü bağlanarak tasarlanan sistemde üç farklı senaryo oluşturulmuştur. Her MGNT algoritması üç senaryoya uygulanarak analizler yapılmıştır. İlk senaryoda ışınım değerlerinin değiştirilmesiyle parçalı gölgelenme durumu elde edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda geleneksel yöntem olan D&G algoritması diğer algoritmalara göre MGN'yi daha geç takip ettiği görülmüştür. PSO'ya dayalı ileri beslemeli YSA tekniğinin, klasik ileri beslemeli YSA tekniğine ve D&G algoritmasına göre daha hızlı bir şekilde MGN'yi bulduğu gözlemlenmiştir. PSO-YSA %99.72 verimlilikle takip ederken, YSA %99.696 ve D&G algoritması %98.442 verimlilikle takip etmektedir. Simülasyon ortamında yapılan parçalı gölgelenme durumunu desteklemek amacıyla diğer iki senaryoda güneşli ve bulutlu iki farklı güne ait gerçek ışınım verileri kullanılmıştır. Güneşli gün için yapılan analizde PSO'ya dayalı ileri beslemeli YSA tekniği, YSA tekniği ve D&G algoritması sırasıyla %99.547, %99.166 ve %94.356 verimlilikle MGN'yi takip etmektedir. Bulutlu gün için yapılan analizde ise %94.934 verimlilikle PSO-ANN tekniği öne çıkmaktadır. YSA tekniği %94.922 ve D&G algoritması %93.522 verimliliktedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında PSO'ya dayalı ileri beslemeli YSA tekniği ön plana çıkarak hibrit oluşturulan algoritmaların avantajını göstermektedir. Gelecekte yapılacak olan çalışmalar için PSO gibi farklı yapay zeka tabanlı algoritmalara dayalı YSA tekniği oluşturularak MGNT için iyileştirme çalışmaları yapılabilir. Farklı çevresel koşullar ve arıza analizleri için optimize edilebilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, Sajib, Saad Mekhilef, Marizan Mubin, Kok Soon Tey, and Mostefa Kermadi. 2023. "An Enhanced Scanning Technique for Flexible Power Point Tracking under Partial Shading Condition." *Solar Energy* 262(January):111817. doi: 10.1016/j.solener.2023.111817.
- Al-Majidi, Sadeq D., Maysam F. Abbod, and Hamed S. Al-Raweshidy. 2020. "A Particle Swarm Optimisation-Trained Feedforward Neural Network for Predicting the Maximum Power Point of a Photovoltaic Array." *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 92(September 2019):103688. doi: 10.1016/j.engappai.2020.103688.
- Bollipo, Ratnakar Babu, Suresh Mikkili, and Praveen Kumar Bonthagorla. 2020. "Hybrid, Optimization, Intelligent and Classical PV MPPT Techniques: Review." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 7(1):9–33. doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.02720.
- Bouselham, L., B. Hajji, and H. Hajji. 2015. "Comparative Study of Different MPPT Methods for Photovoltaic System." Pp. 1–5 in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*. IEEE.
- Divyasharon, R., R. Narmatha Banu, and D. Devaraj. 2019. "Artificial Neural Network Based MPPT with CUK

Converter Topology for PV Systems Under Varying Climatic Conditions.” Pp. 1–6 in *2019 IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*. IEEE.

Elbarbary, Zakaria Mohamed Salem, and Mohamed Abdullrahman Alranini. 2021. “Review of Maximum Power Point Tracking Algorithms of PV System.” *Frontiers in Engineering and Built Environment* 1(1):68–80. doi: 10.1108/FEBE-03-2021-0019.

Farah, Lotfi, Amir Hussain, Abdelfateh Kerrouche, Cosimo Ieracitano, Jamil Ahmad, and Mufti Mahmud. 2020. “A Highly-Efficient Fuzzy-Based Controller with High Reduction Inputs and Membership Functions for a Grid-Connected Photovoltaic System.” *IEEE Access* 8:163225–37. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016981.

Fathi, Milad, and Jafar Amiri Parian. 2021. “Intelligent MPPT for Photovoltaic Panels Using a Novel Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Based on Evolutionary Algorithms.” *Energy Reports* 7:1338–48. doi: 10.1016/j.egyr.2021.02.051.

Hashim, Hadi Fakhir, Marwah M. Kareem, Waleed Khalid Al-Azzawi, and Adnan H. Ali. 2021. “Improving the Performance of Photovoltaic Module during Partial Shading Using ANN.” *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)* 12(4):2435. doi: 10.11591/ijpeds.v12.i4.pp2435-2442.

Ibrahim, Al-wesabi Wesabi, M. B. B. Shafik, Min Ding, Mohammad Abu Sarhan, Zhijian Fang, Ahmed G. Alareqi, Tariq Almoqri, and Ayman M. Al-Rassas. 2020. “PV Maximum Power-Point Tracking Using Modified Particle Swarm Optimization under Partial Shading Conditions.” *Chinese Journal of Electrical Engineering* 6(4):106–21. doi: 10.23919/CJEE.2020.000035.

Javed, Saba, and Kashif Ishaque. 2022. “A Comprehensive Analyses with New Findings of Different PSO Variants for MPPT Problem under Partial Shading.” *Ain Shams Engineering Journal* 13(5):101680. doi: 10.1016/j.asej.2021.101680.

Li, Hong, Duo Yang, Wenzhe Su, Jinhu Lu, and Xinghuo Yu. 2019. “An Overall Distribution Particle Swarm Optimization MPPT Algorithm for Photovoltaic System Under Partial Shading.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66(1):265–75. doi: 10.1109/TIE.2018.2829668.

Majeed Shaikh, Abdul, Mohammad Fawad Shaikh, Shoaib Ahmed Shaikh, Moez Krichen, Rehan Ali Rahimoon, and Abdul Qadir. 2023. “Comparative Analysis of Different MPPT Techniques Using Boost Converter for Photovoltaic Systems under Dynamic Shading Conditions.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 57(August 2022):103259. doi: 10.1016/j.seta.2023.103259.

Mao, Mingxuan, Lichuang Cui, Qianjin Zhang, Ke Guo, Lin Zhou, and Han Huang. 2020. “Classification and Summarization of Solar Photovoltaic MPPT Techniques: A Review Based on Traditional and Intelligent Control Strategies.” *Energy Reports* 6:1312–27. doi: 10.1016/j.egyr.2020.05.013.

Mittal, Poornima, Tarush Goel, and Pratyush Gupta. 2020. “Evolution of MPPT Algorithms in Solar Arrays.” *Materials Today: Proceedings* 37(Part 2):3154–58. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.045.

Miyatake, Masafumi, Fuhito Toriumi, Tsugio Endo, and Nobuhiko Fujii. 2007. “A Novel Maximum Power Point Tracker Controlling Several Converters Connected to Photovoltaic Arrays with Particle Swarm Optimization Technique.” Pp. 1–10 in *2007 European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE.

Mountassir, Salaheddine, Saad Sarih, and Abdelouahed Tajer. 2022. “A FUZZY LOGIC MPPT BASED CONTROL FOR A PHOTOVOLTAIC SYSTEM.” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 100(11):3730–38.

Obukhov, Sergey, Ahmed Ibrahim, Ahmed A. Zaki Diab, Ameena Saad Al-Sumaiti, and Raef Aboelsaud. 2020. “Optimal Performance of Dynamic Particle Swarm Optimization Based Maximum Power Trackers for Stand-Alone PV System Under Partial Shading Conditions.” *IEEE Access* 8:20770–85. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966430.

Pragallapati, Nataraj, Tanuj Sen, and Vivek Agarwal. 2017. “Adaptive Velocity PSO for Global Maximum Power Control of a PV Array Under Nonuniform Irradiation Conditions.” *IEEE Journal of Photovoltaics* 7(2):624–39. doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2629844.

Priyadarshi, Neeraj, Sanjeevikumar Padmanaban, Jens Bo Holm-Nielsen, Frede Blaabjerg, and Mahajan Sagar Bhaskar. 2020. “An Experimental Estimation of Hybrid ANFIS–PSO-Based MPPT for PV Grid Integration Under Fluctuating Sun Irradiance.” *IEEE Systems Journal* 14(1):1218–29. doi: 10.1109/JSYST.2019.2949083.

Rahman, Md. Motakabbir, and Md. Shahidul Islam. 2020. "PSO and ANN Based Hybrid MPPT Algorithm for Photovoltaic Array under Partial Shading Condition." *Engineering International* 8(1):9–24. doi: 10.18034/ei.v8i1.481.

Rastogi, Digant, Manika Jain, and Mini Sreejeth. 2022. "Comparative Study of DC-DC Converters in PV Systems Using Fuzzy Logic MPPT Algorithm." Pp. 1–7 in *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*. IEEE.

Sai, Boni Satya Varun, Sarang A. Khadtare, and Debashis Chatterjee. 2023. "An Improved Weather Adaptable P&O MPPT Technique under Varying Irradiation Condition." *ISA Transactions* (xxxx). doi: 10.1016/j.isatra.2023.05.025.

Sarvi, Mohammad, and Ahmad Azadian. 2022. "A Comprehensive Review and Classified Comparison of MPPT Algorithms in PV Systems." *Energy Systems* 13(2):281–320. doi: 10.1007/s12667-021-00427-x.

Wasim, Muhammad Shahid, Muhammad Amjad, Salman Habib, Muhammad Abbas Abbasi, Abdul Rauf Bhatti, and S. M. Muyeen. 2022. "A Critical Review and Performance Comparisons of Swarm-Based Optimization Algorithms in Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Systems under Partial Shading Conditions." *Energy Reports* 8:4871–98. doi: 10.1016/j.egy.2022.03.175.

Zhang, Wei, Guopeng Zhou, Hao Ni, and Yunlian Sun. 2019. "A Modified Hybrid Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Arrays Under Partially Shading Condition." *IEEE Access* 7:160091–100. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950375.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.06.2023
Kabul Tarihi : 21.10.2023

Received Date : 29.06.2023
Accepted Date : 21.10.2023

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ GÖZENEKLİ SANDVIÇ KİRİŞLERİN ZORLANMIŞ TİTREŞİM ANALİZİ

FORCED VIBRATION ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED POROUS SANDWICH BEAMS

Ajmal CHOPAN¹ (ORCID: 0009-0000-8718-4321)
Ahmad Reshad NOORI^{1*} (ORCID:0000-0001-6232-6303)

¹ İstanbul Gelişim Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmad Reshad NOORI, arnoori@gelisim.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeden yapılmış sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı teorik olarak incelenmiştir. Üç tabakadan oluşan sandviç kirişin alt ve üst katmanını izotropik homojen ve çekirdek tabakası ise gözenekli malzemeli olarak modellenmiştir. Modellenen kirişlerin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilebilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır. Ele alınan yapı elemanlarının sonlu eleman modellerinin kurulması için birinci mertebeden kayma deformasyon etkisine dayalı BEAM189 elemanı kullanılmıştır. Kirişin kesit özelliklerinin üniform olduğu varsayılmıştır. Analizlerde simetrik, üniform ve monolitik olmak üzere üç çeşit gözenek fonksiyonundan faydalanılmıştır. Kesit kalınlığı boyunca elastik modül ve yoğunluk değişken olarak, Poisson oranı ise sabit olarak alınmıştır. Kirişler ankastre – ankastre, ankastre – sabit, sabit – sabit ve ankastre – serbest olarak modellenmiştir. Malzeme değişim katsayısının, malzeme değişim fonksiyonunun, çeşitli sınır koşullarının ve sönüm katsayılarının dinamik analiz üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre malzeme gözenek fonksiyonu ve malzeme değişim katsayıları dinamik analizin sonuçlarından genlik ve periyot değerlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Viskoelastik durumda sönüm oranı arttıkça genlik değerlerinin daha hızlı bir şekilde küçüldüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sandviç kiriş, Zorlanmış Titreşim Analizi, Gözenekli Malzeme, Viskoelastik Davranış, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

In this paper, the elastic and viscoelastic forced vibration behavior of sandwich beams made of functionally graded porous material is investigated theoretically. The bottom and top layers of the sandwich beam consisting of three layers are modeled as isotropic homogeneous and the core layer is modeled as porous material. ANSYS software is used to analyze the modeled beams by the finite element method. BEAM189 element which is based on the first-order shear deformation effect is used to generate the finite element models of the considered structural elements. The cross-sectional properties of the beam are assumed to be uniform. Three types of porosity functions are used in the analysis: symmetric, uniform, and monolithic. The modulus of elasticity and density are taken as variables along the section thickness and the poisson ratio is taken as constant. The beams are modeled as clamped-clamped, clamped - pinned, pinned - pinned, and clamped - free. The effects of material variation coefficient, material functions, various boundary conditions, and damping coefficients on the dynamic analysis are investigated in detail. Based on the results obtained from this study, it has been seen that the material function and material distribution coefficients significantly affect the amplitude and period values of the results of dynamic analysis. In the viscoelastic case, it is observed that as the damping ratio increases, the amplitude values decrease more rapidly.

Keywords: Sandwich Beam, Forced Vibration Analysis, Porous Material, Viscoelastic Behavior, Finite Element Method

GİRİŞ

Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli malzemeler (FDGM), genellikle, içerdikleri gözeneklerin boyutu, şekli, dağılımı ve yoğunluğunun belirli bir yönde değiştiği malzemelerdir. Bu malzemelerin üretimi genellikle özel teknikler gerektirir ve bu malzemeler genellikle özelleştirilmiş uygulamalar için kullanılır. FDGM'lerin önemi, çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda bulunabilir. Birçok durumda, bu malzemelerin kullanımı, belirli bir uygulamanın performansını artırabilir veya belirli bir problemin çözümünü kolaylaştırabilir. Günümüzde, FD sandviç kirişler ve plakalar mühendislik endüstrilerinin birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yapısal elemanlar enine kuvvetlere, düzlem içi kuvvetlere ve dinamik kuvvetlere maruz kalırlar. Bu nedenle, FG sandviç kirişlerin doğru yapısal analizi, eğilme, burkulma ve titreşim davranışlarını tahmin etmek için gereklidir. Bu bakış açısıyla, FG sandviç kiriş ve plakaların analizi üzerine birçok araştırma yapılmıştır.

Noori vd. (2020) FD malzemeli simetrik ve simetrik olmayan katmanlardan oluşan sandviç kirişlerin statik davranışını Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile incelemiştir. Çalışmalarında malzeme değişim katsayısı yükseldikçe yer değiştirmelerin de arttığını rapor etmiştir. Noori vd. (2020) FD kirişlerin TFY ile statik analizini araştırmışlardır. Fortan dilinde kodlanmış bir bilgisayar programı kullanmışlar ve programdan elde edilen sonuçları tablolar halinde mevcut literatür sonuçları ile karşılaştırarak uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir. Ai ve Weaver (2016) değişken rijitlikli malzemelerin kullanıldığı, konik sandviç kirişlerin yaklaşık çözümünü elde etmek için basitleştirilmiş analitik model araştırmışlardır. Minimum toplam potansiyel enerji yöntemi ile Ritz tekniğini birlikte kullanmışlardır. Çekirdekdeki eksenel rijitlik değişimi nedeniyle, kirişlerin yer değiştirmelerinin ve yüz tabakalarının ve çekirdeğin gerilmelerinin önemli ölçüde etkilendiğini bulmuşlardır. Ait Atmane vd. (2017) elastik temeller üzerine oturan FD kirişlerin mekanik tepkisi üzerinde kalınlık ve gözenekliliğin etkisini araştırmışlardır. Akbaş (2018) FD gözenekli derin kirişlerin zorlanmış titreşim analizini harmonik dış yayılı yük altında gözeneklilik etkisi ile sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemiştir. Gözeneklilik parametresi arttıkça, gözeneklilik modelleri arasındaki farkın önemli ölçüde arttığını vurgulamıştır.

Srikarun vd. (2021) farklı yayılı yükler altında FD gözenekli çekirdeğe sahip sandviç kirişlerin doğrusal ve doğrusal olmayan statik eğilmesini araştırmışlardır. Amirani vd. (2009) FD çekirdekli sandviç kirişin Galerkin yöntemi ile serbest titreşim analizini incelemişlerdir. FD çekirdeği için sonuçlar, karışım kuralları ve mikromekanik teknikleri kullanarak çıkarılmış ve karşılaştırmışlardır. Chen vd. (2016) kayma deformasyonlu FD gözenekli kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşimlerini incelemişlerdir. Das ve Sarangi (2016) FD kompozit kirişlerin statik analizini incelemişlerdir. FD malzemesinin, farklı homojen malzeme katmanlarından oluştuğunu varsaymışlardır.

Vo vd. (2014) Rafine kayma deformasyon teorisini kullanarak FD kirişlerin statik ve titreşim analizini incelemişlerdir. Kayma düzeltme faktörü gerektirmeyen geliştirilen bu teori, statik tepkileri, doğal frekansları ve ilgili mod şekillerini doğru bir şekilde tahmin edebilmektedir. Zhao vd. (2019), genel sınır koşullarına sahip orta kalınlıkta FD gözenekli derin kavisli ve düz kirişin titreşim davranışını incelemek için birleşik bir analitik model oluşturmak üzere modifiye edilmiş bir seri çözüm benimsemişlerdir. Rezaiee-Pajand vd. (2018) FD prizmatik olmayan sandviç kirişlerin statik analizini araştırmışlardır. Njim vd. (2022) FD gözenekli malzemeli sandviç yapının deneysel ve sayısal eğilme özelliklerini araştırmışlardır. Deneylelerden elde edilen sonuçları doğrulamak için ANSYS yazılımını kullanarak sayısal yaklaşım kullanmışlardır. Daouadji vd. (2013) bir FD kiriş için düzlem elastisite çözümü geliştirmişlerdir. Doğrusal yayılı yüke maruz bir konsol FD kiriş için genel bir iki boyutlu çözüm elde etmişlerdir. Sankar (2001) sinüzoidal enine yüklemeye maruz basit mesnetli FD kirişler için bir elastisite çözümü geliştirmiştir. Ying vd. (2008) Winkler-Pasternak elastik temelleri üzerine oturan FD kirişlerin eğilme ve serbest titreşimi için 2 boyutlu elastisite teorisine dayalı kesin çözümler elde etmişlerdir. Gradyan indeksi, en-boy oranları ve temel parametreleri gibi çeşitli parametrelerin FD kirişlerin mekanik davranışı üzerindeki etkileri incelemiştir. Turan (2022), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak trigonometrik kayma deformasyonlu kiriş teorisine dayalı FD gözenekli kirişlerin statik analizini elde etmiştir.

Chu vd. (2015), eğilme ve çekme etkisindeki FD malzemeli kirişlerin elastisite çözümünü elde etmişlerdir. Xu vd. (2014), kalınlığı değişen FD kirişlerin iki boyutlu elastisite çözümlerini sunmuşlardır. Zhong ve Yu (2007) farklı yüklere maruz bir konsol FD kirişi analiz etmişlerdir. Ding vd. (2007), anizotropik FDM'lerin düzlem gerilme problemi için Airy gerilme fonksiyonunu kullanarak düzlem anizotropik FD kirişler için gövde kuvvetinin etkisini dahil ederek elastisite çözümleri elde etmişlerdir. Huang vd. (2007) tarafından keyfi olarak dağıtılmış bir yüke maruz kalan anizotropik bir kirişin eğilme problemini çözmüşlerdir. Huang vd. (2009) de doğrusal dağılımlı yüke maruz kalan FD anizotropik konsol kirişin eğilmesini sunmuşlardır. Çelebi ve Tütüncü (2014) düzlem elastisite teorisini kullanarak FD kirişlerin tam doğal frekanslarını elde etmişlerdir. Venkataraman ve Sankar (2003) FD çekirdekli bir

sandviç kirişteki gerilmeler için elastisite çözümünü analiz etmişlerdir. Aydoğdu ve Taşkın (2007), çeşitli kayma deformasyon teorilerini kullanarak basit mesnetli FD kirişlerin doğal frekanslarını elde etmek için Navier tipi çözüm yöntemini kullanmışlardır. Naderi ve Saidi (2013), rafine edilmiş birinci dereceden yer değiştirme alanı kullanarak çeşitli sınır koşullarına sahip orta kalınlıktaki FD anizotropik geniş kirişler üzerindeki eğilme ve gerilmenin etkilerini sunmuşlardır. Akbaş (2015), Timoshenko kiriş teorisini kullanarak Navier çözüm tekniğine dayalı elastik temele oturan FD kirişlerin statik ve serbest titreşim analizini sunmuştur. Aydogdu (2008) ve Aydogdu vd. (2013), Euler-Bernoulli kiriş teorisine dayanan yarı-ters yöntemi kullanarak aksel FD basit mesnetli kirişlerin doğal frekanslarını ve kritik burkulma yüklerini elde etmişlerdir. Turan ve Adiyaman (2023), çift yönlü FD gözenekli kirişlerin yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisine dayalı serbest titreşim ve burkulma davranışını incelemek için sonlu elemanlar yöntemini uygulamışlardır.

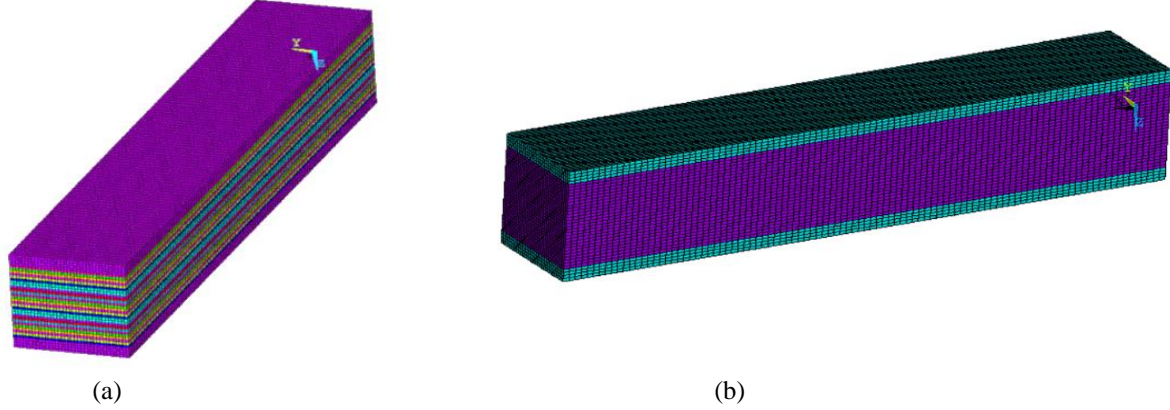
Kiani ve Eslami (2010, 2013) Euler-Bernoulli kiriş teorisini kullanarak çeşitli sınır koşullarına sahip FD kirişlerin termal burkulması için kapalı formda çözüm elde etmişlerdir. Alshorbagy vd. (2011) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak FD kirişlerin serbest titreşim özelliklerini incelemişlerdir. Şimşek ve Al-Shujairi (2017), Timoshenko kiriş teorisini kullanarak sabit hızlarla hareket eden çift hareketli harmonik yüklerin etkisi altındaki FD sandviç kirişlerin serbest ve zorlanmış titreşimini sunmuşlardır. Bhangale ve Ganesan (2006) sonlu elemanlar yöntemini kullanarak termal ortamda kısıtlı viskoelastik tabakaya sahip FD sandviç kirişin burkulma ve titreşim davranışını incelemişlerdir. Kim ve Lee (2016, 2017), FD sandviç kirişlerin eğilme ve burulma analizleri için sonlu eleman formülasyonu sunmuşlardır. Wattanasakulpong ve Chaikittiratana (2015), FDM'lerden yapılmış gözenekli kirişlerin eğilme titreşim analizini çeşitli sınır koşulları ile gerçekleştirmişlerdir. Ebrahimi vd. (2016) sıcaklığa bağlı Euler FD gözenekli kirişlerin titreşim davranışı üzerindeki termal etkileri araştırmışlardır. Al Rjoub ve Hamad (2017), farklı sınır koşullarına sahip FD Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerin serbest titreşimini incelemek için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Gao vd. (2019), FD gözenekli kirişlerin dinamik özelliklerini araştırmışlardır. Turan ve Kahya (2021) FD sandviç kirişlerin serbest titreşim ve burkulma analizlerini Navier yöntemi ile sunmuşlardır. Liu vd. (2019) Euler-Bernoulli hipotezine dayalı olarak dairesel sığ kemerlerin burkulma analizini sunmuşlardır. Jabbari vd. (2014) ve Mojahedin vd. (2016) gözeneklilik dağılımının doymuş gözenekli ince dairesel plakların burkulma davranışı üzerindeki etkisini sırasıyla klasik plak teorisi ve yüksek dereceli kayma deformasyon teorisine dayanarak tartışmışlardır. Su vd. (2019) konsantre bir enine yük altında FDG nano kirişlerin statik eğilme davranışını analitik olarak incelemişlerdir. Chen vd. (2019) bir FDG çekirdek ve iki izotropik homojen yüzey tabakasından oluşan yeni bir sandviç plaka önermiş ve burkulma analizi birinci mertebeden kayma teorisi ve Chebyshev-Ritz yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir. Daikh ve Zenkour (2019) izotropik çekirdek ve iki FDG yüz tabakasına sahip bir sandviç plak geliştirmiş ve burkulma davranışı ve Navier çözüm prosedürü kullanılarak değerlendirmişlerdir. Jamshidi vd. (2019) Taguchi optimizasyon yöntemini kullanarak, uzunluk ve kalınlık yönleri boyunca değişen gözenekliliğe sahip FDG kirişlerin burkulma sonrası optimizasyon analizini sunmuşlardır. Fouaidi vd. (2020) FDG kirişlerin doğrusal olmayan eğilme davranışını araştırmışlardır. Turan vd. (2023), FD kirişlerin serbest titreşim ve eğilme analizini analitik olarak, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla ve yapa zeka ile çözmüştür.

Yazarların bilgisine göre, literatür incelendiğinde FD gözenekli sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik davranışını ANSYS sonlu elemanlar metoduyla inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu çalışmanın amacı literatüre bu yönüyle katkı yapmaktır. Bu çalışmada, BEAM189 (kuadratik çubuk) elemanı kullanılarak FD sandviç kirişlerin zorlanmış dinamik titreşim analizi teorik olarak sonlu elemanlar yöntemi ile yapılmıştır. Analizlerde simetrik, üniform ve monolitik olmak üzere üç adet farklı gözenek fonksiyonu dikkate alınmıştır. Elastik ve viskoelastik incelemesinde ankastre-ankastre, ankastre-sabit, sabit-sabit ve ankastre serbest sınır koşulları ele alınmıştır. Malzeme değişim katsayısının, sönüm oranının, mesnet koşullarının ve gözenek fonksiyonlarının, FDG sandviç kirişlerin dinamik davranışı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu makale, şu şekilde düzenlenmiştir, ilk bölümde giriş ve literatür taraması sunulmuştur. İkinci bölümde malzeme fonksiyonları ve kullanılan metod anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ise bu makale çalışmasının en önemli bulguları verilmiş ve yorumlanmıştır. Son bölümde makaleden elde edilen önemli sonuçlar değerlendirilmiş ve öneriler sunulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, ANSYS programı ile FDG sandviç kirişlerinin modellenmesinde 3 boyutlu kuadratik kiriş elemanı olan BEAM189 kullanılmıştır. Sönümsüz titreşim davranışı incelenirken herhangi bir sönüm oranı girilmemiştir. Sönümlü titreşim davranışı araştırılırken sadece rijitlik matrisin sönüm matrisine olan katkısı ele alınmıştır. Kütle matrisinin sönüm matrisine olan katkısı ise ihmal edilmiştir. Kullanılan BEAM189 elemanı kuadratik üç düğümlü çubuk elemanı olup her düğüm noktasında x,y,z yönlerinde ötelenme ve bu eksenler etrafında dönme olmak üzere toplam altı adet serbestlik derecesine sahiptir. Bu eleman Timoshenko kiriş teorisine dayalıdır. Kullanılan bu hazır

sonlu elemanın kabulleri, teorisi ve kısıtları ile ilgili bilgileri Ansys eleman refranslarında yer almaktadır. FD sandviç çubuklarına malzeme özellikleri atanırken excel programı yardımıyla hesaplanan değerler kullanılmıştır. Noori vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada olduğu gibi çubuk kalınlığı boyunca 36 katmana ayrılmış ve önceden hesaplanan malzeme özellikleri her katmana ayrı ayrı girilmiştir. Kiriş uzunluk boyunca 100 adet sonlu elemana bölünmüştür. Yükleme, z eksenini doğrultusunda uygulanmıştır. Şekil 1, simetrik ve üniform gözenekli malzeme durumlarını göstermektedir.



Şekil 1. Gözenekli Çekirdeğe Sahip Olan (a) Simetrik ve (b) Üniform Malzemeli FD Sandviç Kirişin Modeli

L uzunluğunda, h kalınlığında ve b genişliğinde FD sandviç kirişi ele alınmıştır. Bu çalışmada kullanılan çubuk, farklı kalınlığa sahip 3 adet katmanlardan oluşmaktadır. Alt katman $\left(-\frac{h}{2} \leq z \leq -\frac{7h}{18}\right)$ ve üst katman $\left(+\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{h}{2}\right)$ izotropik homojen malzemeden yapılmışken, çekirdek katmanı $\left(-\frac{7h}{18} \leq z \leq +\frac{7h}{18}\right)$ FDG malzemeden yapılmıştır. Çekirdek için kullanılan gözenekli malzemeler için üç farklı durum düşünülmüştür. Bu üç farklı malzeme durumu, simetrik porozite dağılımı, Monolitik gözeneklik dağılımı ve üniform gözeneklik dağılımı olarak dikkate alınmıştır. Bu çalışmada, Poison oranı sabit olarak kabul edilmiştir (Sankar (2001)). Bu bölümde kütleli yoğunluğun ve elastisite modülünün dağılımı verilecektir. Malzeme dağılım fonksiyonları, simetrik porozite durumu için denklem (1-9) üniform porozite durumu için denklem (10-18) ve monolitik durumu için denklem (19-27) olarak Wattanasakulpong ve Eiadtrong (2022) tarafından verilmiştir. Sınır koşulları ise Tablo (1)'de sunulmuştur.

Tablo 1. Sınır Koşulları

Mesnet Durumu	Sınır koşulları	
	i	j
Sabit-Sabit (S-S)	$U_x = U_y = U_z = 0$	$U_y = U_x = U_z = 0$
Ankastre – Serbest (A-SR)	$Rot_y = Rot_x = Rot_z = U_y = U_x = U_z = 0$	-----
Ankastre – Sabit (A-S)	$Rot_y = Rot_x = Rot_z = U_y = U_x = U_z = 0$	$U_y = U_x = U_z = 0$
Ankastre– Ankastre (A-A)	$Rot_x = Rot_z = Rot_y = U_y = U_x = U_z = 0$	$Rot_z = Rot_x = Rot_y = U_z = U_x = U_y = 0$

Kiriş kesiti 1296 sonlu elemandan oluşmaktadır ve ilk dört ve son dört katman izotropik homojen iken orta katmanlar FDG malzemelerden yapılmıştır. ANSYS Mechanical APDL'deki Custom Sections sekmesinde Edit/Built-up özelliği kullanılarak her katman için gerekli malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Kirişler, uzunlukları boyunca 100 adet sonlu elemana bölünmüştür. ANSYS programı zorlanmış titreşim davranışı problemlerinin çözümünde adım adım zaman integrasyon yöntemi veya Newmark yöntemini kullanmaktadır.

$$\text{Üst Katman} \quad E(z) = E_1 \quad (1)$$

$$G(z) = G_1 \quad (2)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \quad (3)$$

$$\text{Çekirdek} \quad E(z) = E_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (4)$$

$$G(z) = G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (5)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z}{h_c}\right) \right] \quad (6)$$

$$E(z) = E_2 \quad (7)$$

$$\text{Alt katman} \quad G(z) = G_2 \quad (8)$$

$$\rho(z) = \rho_2 \quad (9)$$

$$E(z) = E_1 \quad (10)$$

$$\text{Üst katman} \quad G(z) = G_1 \quad (11)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \quad (12)$$

$$E(z) = E_1 [1 - e_0 \varphi] \quad (13)$$

$$\text{Çekirdek} \quad G(z) = G_1 [1 - e_0 \varphi] \quad (14)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \sqrt{1 - e_0 \varphi} \quad (15)$$

$$E(z) = E_2 \quad (16)$$

$$\text{Alt katman} \quad G(z) = G_2 \quad (17)$$

$$\rho(z) = \rho_2 \quad (18)$$

$$E(z) = E_1 \quad (19)$$

$$\text{Üst Katman} \quad G(z) = G_1 \quad (20)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \quad (21)$$

$$E(z) = E_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (22)$$

$$\text{Çekirdek} \quad G(z) = G_1 \left[1 - e_0 \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (23)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \left[1 - e_m \cos\left(\frac{\pi z h_c}{2} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (24)$$

$$E(z) = E_1 \quad (25)$$

$$\text{Alt katman} \quad G(z) = G_1 \quad (26)$$

$$\rho(z) = \rho_1 \quad (27)$$

burada h_c çekirdek kalınlığı ve φ ise,

$$\varphi = \frac{1}{e_0} - \frac{1}{e_0} \left(\frac{2}{\pi} \sqrt{1 - e_0} - \frac{2}{\pi} + 1 \right)^2 \quad (28)$$

denklemleri ile verilmektedir. Yukarıdaki denklemlerde, e_0 porozite katsayısı, E_1 , G_1 ve ρ_1 sırasıyla maksimum elastisite modülünü, kayma modülünü ve kütleli yoğunluğu temsil eder. Kütleli yoğunluk için gözeneklilik katsayısı (e_m) aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$e_m = 1 - \sqrt{1 - e_0} \quad (29)$$

Bu çalışmada yapılan viskoelastik analiz için [C], denklem [30]'de verilmektedir.

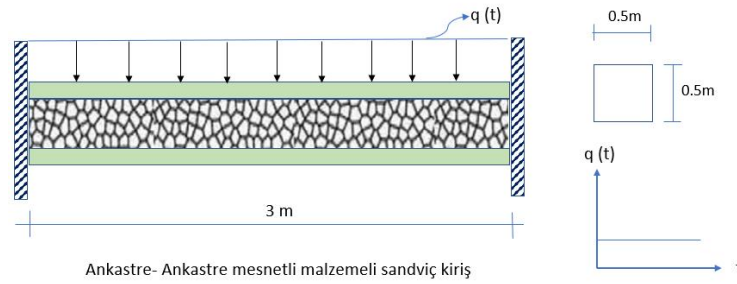
$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (30)$$

Bu denklemlerde, α , kütle matrisi çarpanını, $[M]$, kütle matrisini, β , rijitlik matrisi çarpanını ve $[K]$ = rijitlik matrisini temsil etmektedir. Bu çalışmada α değeri sıfır alınarak kütle matrisinin sönüm matrisine olan etkisi ihmal edilmiştir. Yapısal sönüm oranları ile β katsayısı arasındaki ilişki $\beta = 2\zeta_i/w_i$ şeklindedir. Bu denklemde ζ_i yapısal sönüm oranı, w_i ise yapısal serbest titreşim frekanslarıdır.

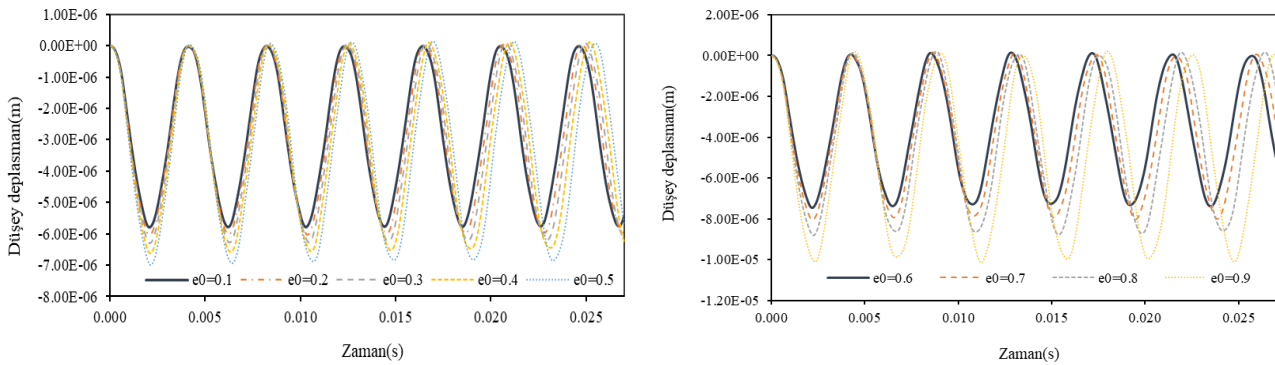
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, FD sandviç kirişin elastik davranışlarını incelenirken 512 zaman adım ve viskoelastikte ise 256 zaman adım dikkate alınmıştır. Al-itbi ve Noori (2022) FDG kirişlerin serbest titreşim davranışını incelemiştir. Çalışmalarından elde edilen frekans değerlerinden periyotlar hesaplanmıştır. Bu çalışmada, altı periyot için çözüm yapılmıştır. Noori et al. (2018) Newmark metodunu kullanarak FD kirişin zorlanmış titreşimi araştırmıştır.

Hesaplamalarda kirişin altı periyodunu 32,64,128,256 ve 512 zaman adım için çözmüştür, 256 ve 512 zaman adımı için elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğunu ve 512 adımdan sonra sonuçların değişmediğini rapor etmiştir. İlk sayısal uygulama olarak, şekil 2’de verilen iki ucu ankastre mesnetli ve çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe $q_0 = 10.000$ N/m düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri ise $E_1 = 200 \times 10^9$ pa , $G_1 = 76 \times 10^9$ pa ve $\rho_1 = 7850$ kg/cm³ değerleri olarak alınmıştır. Kirişin uzunluğu 3 m, enkesit genişliği 0.5 m, ve enkesit yüksekliği ise 0.5 m olarak belirlenmiştir. Kiriş boyutlarının bu şekilde seçilmesinin herhangi bir sebebi olmayıp parametrik çalışmalar için tercih edilmiştir. Kirişin üst ve alt katmanı izotropik homojen olup çelikten yapılmıştır. Newmark metodu ile çözüm yapılırken toplam süre 512 zaman adımına bölünmüştür. Bu uygulamanın temel amacı üniform gözenekli sandviç kirişi durumunda gözeneklilik katsayısının zorlanmış titreşim üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu uygulama için elde edilen en büyük düşey yer değiştirme değerlerinin zaman ile değişimi şekil 3’te grafik formunda sunulmuştur.

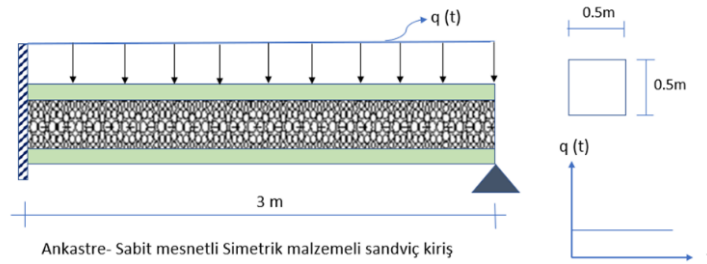


Şekil 2. Dinamik Yük Etkisinde Üniform Malzemeli FD Sandviç Kiriş ve Adım Tipi Yükleme



Şekil 3. Üniform Malzemeli A – A Mesnetli Sandviç Kirişinin Porozite Oranına Göre Düşey Deplasman Değişimi

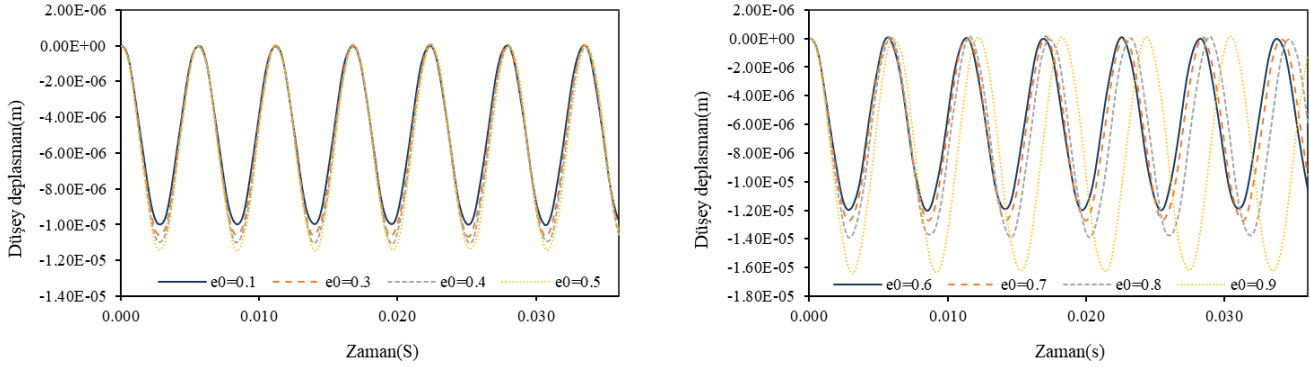
İkinci uygulamada, simetrik gözenekli malzemeden yapılmış bir sandviç kiriş ele alınmıştır. Bu kirişin (şekil 4) bir ucu ankastre diğer ucu ise sabit mesnetli olarak modellenmiştir. Kirişe, $q_0 = 10.000$ N/m düzgün yayılı dinamik yük uygulanmış ve adım tipi fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kirişin orta noktası için elde edilen düşey yer değiştirme değerlerinin zamanla değişimi, şekil 5’te verilmiştir.



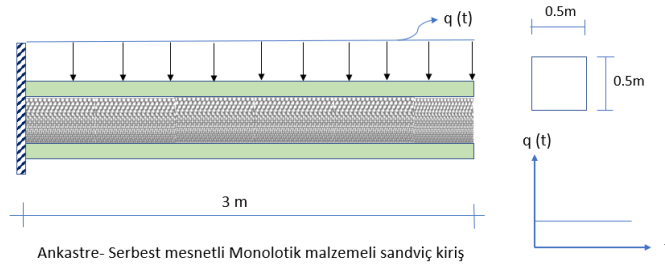
Şekil 4. Dinamik Yük Etkisinde Simetrik Malzemeli FD Sandviç Kiriş ve Adım Tipi Yükleme

Üçüncü uygulama olarak şekil 6’da verilen bir ucu ankastre ve diğer ucu serbest mesnetli ve çekirdeği monolitik gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin elastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile

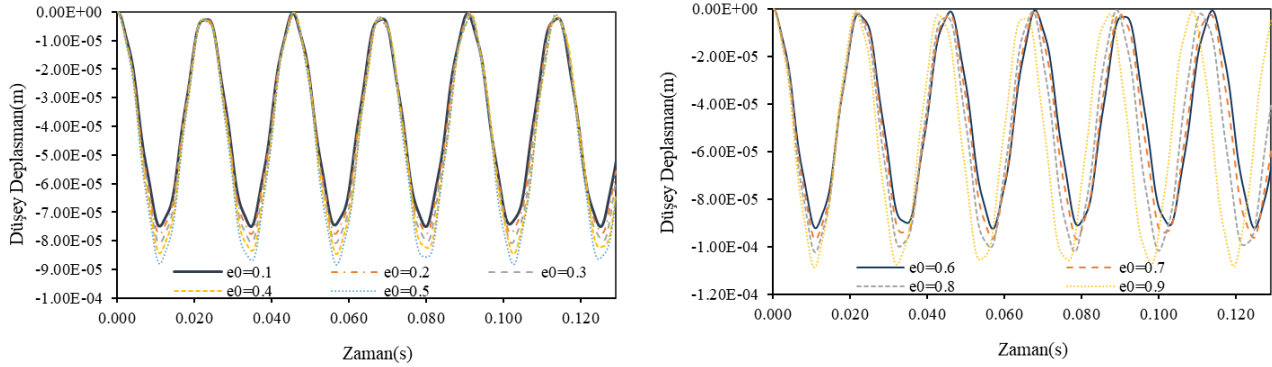
araştırılmıştır. Yükleme, malzeme ve geometrik özellikleri önceki örnek gibi alınmıştır. A – SR mesnet durumunun elastik davranışına ait altı periyot için sonuçlar Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 5. Simetrik Malzemeli A – S Mesnetli Sandviç Kirişinin Porozite Oranına Göre Düşey Deplasmanın Değişimi



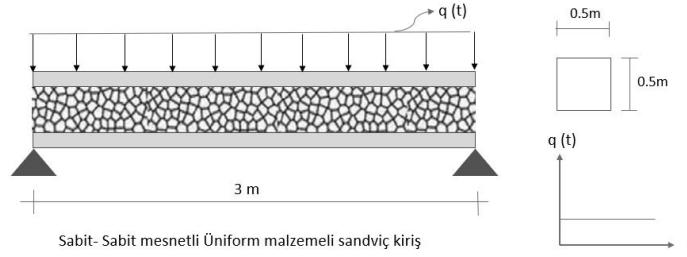
Şekil 6. Dinamik Yük Etkisinde Monolitik Malzemeli FD Sandviç Kiriş ve Adım Tipi Yükleme



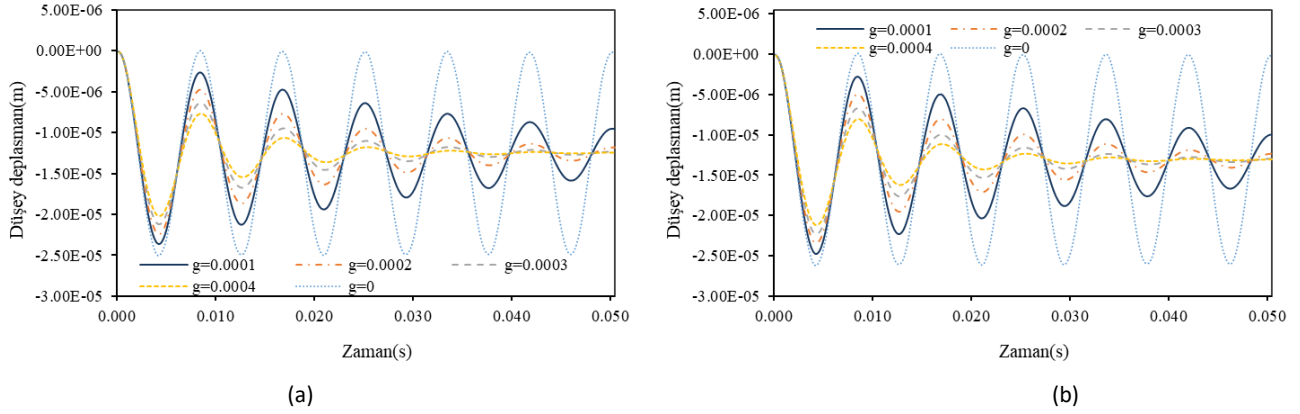
Şekil 7. Monolitik Malzemeli A–Sr Sandviç Kirişinin Porozite Oranına Göre Düşey Deplasmanın Değişimi

Şekil 3,5 ve 7 incelendiğinde tüm malzeme fonksiyonları ve sınır şartları için malzeme değişim katsayısı arttıkça titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmektedir. Bunun sebebi ise gözeneklik oranı ile sistemin rijitliğinin ters orantılı olmasıdır, örneğin gözeneklik oranı arttıkça kirişin rijitliği düşmektedir.

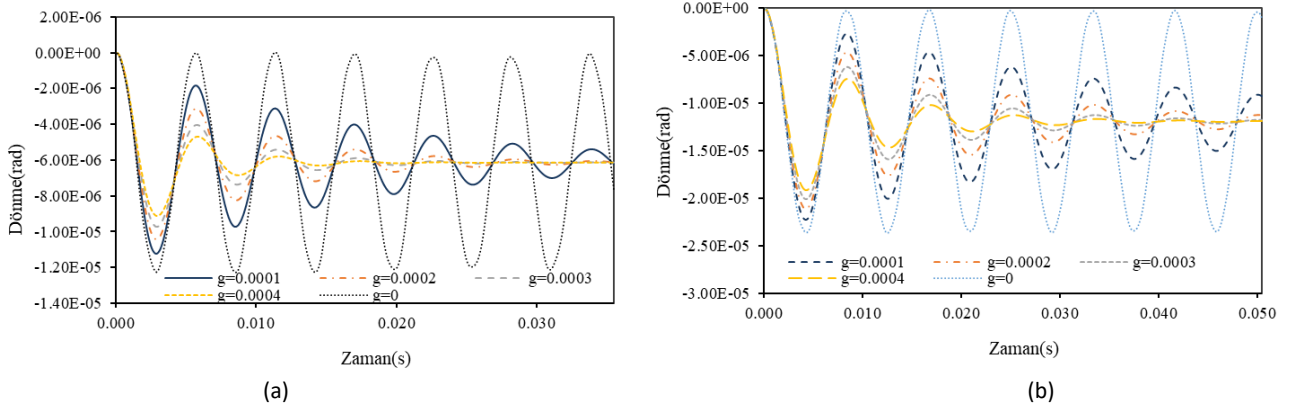
Dördüncü uygulama olarak, Şekil 8’de verilen iki ucu sabit mesnetli ve çekirdeği üniform gözenekli malzemeden yapılmış olan sandviç kirişin viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı sonlu elemanlar yöntemi ile araştırılmıştır. Ele alınan kirişe $q_0 = 10.000 \text{ N/m}$ düzgün yayılı dinamik yük etki etmektedir. Dinamik yük olarak adım tipi fonksiyonu dikkate alınmıştır. Malzeme özellikleri ve geometrik özellikleri ise önceki örneklerdeki gibi alınmıştır. Bu çalışmada, kelvin tipi sönüm modeli kullanılmıştır. Kelvin tipi sönüm modelindeki g değeri β değerine eşit olduğundan grafikler üzerinde sönüm oranı β yerine g ile ifade edilmiştir. Elastik çözüm ve farklı sönüm oranları için viskoelastik çözümler elde edilmiştir. Kirişin orta noktasında hesaplanan düşey deplasman değerleri için elde edilen sonuçlar Şekil 9’da ve mesnette oluşan dönme değerlerinin zamanla değişimi ise Şekil 10’da çizilmiştir.



Şekil 8. Dinamik Yük Etkisinde Üniform Malzemeli S-S Mesnetli FD Sandviç Kiriş ve Adım Tipi Yükleme



Şekil 9. Üniform Malzemeli S – S Mesnetli Sandviç Kirişinin Deplasmanın Değişimi ((a) $e_0=0.4$, (b) $e_0=0.5$)



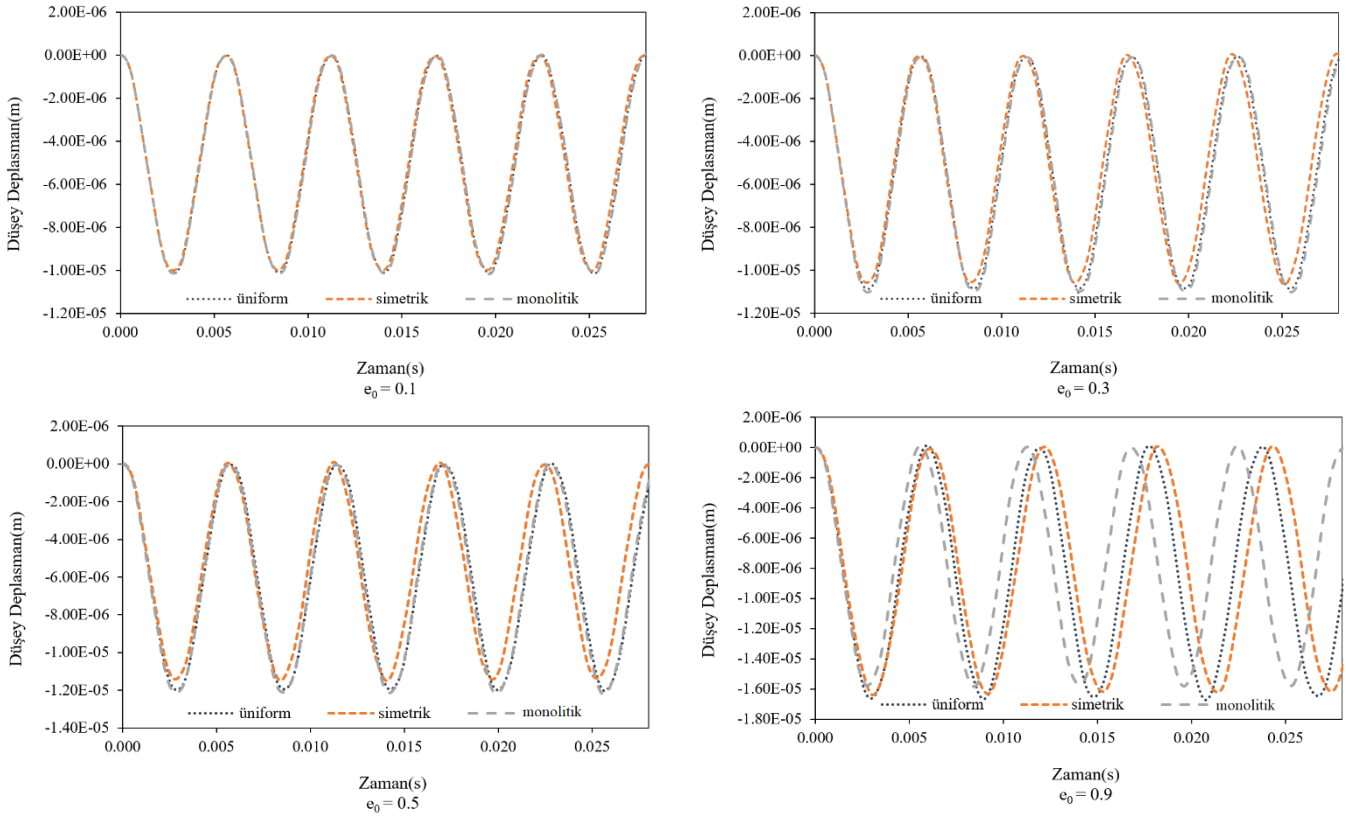
Şekil 10. Üniform Malzemeli S – S Mesnetli Kirişinin Dönme Değerlerinin Değişimi ((a) $e_0=0.2$, (b) $e_0=0.3$)

Şekil (9-10)'dan da görüldüğü gibi elastik durumda, dinamik davranışa ait düşey deplasman ve dönme değerleri, statik değerlerin etrafında salınım yapmaya devam ederken, viskoelastik durumda bu salınım genlikleri zamanla statik değere yaklaşarak kaybolmaktadır. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, sönüm oranının artması, titreşim genliklerinin daha hızlı bir şekilde statik değere yaklaşmasına neden olmaktadır. Viskoelastik durumda, yer değiştirme salınım genlikleri sönüm oranı arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır. Elastik durumda ($\beta = g = 0$ olduğunda) titreşim genliklerin düşmediği görülmüştür. Gerçek problemlerinin sönüm oranını belirlerken yapısal sönüm oranları kullanılabilir. Yapısal sönüm oranları ile β katsayısı arasındaki ilişki daha önceki bölümde verilmiştir.

Makalenin bu aşamasında farklı malzeme durumları için elde edilen değerlerin karşılaştırılması Şekil (11)'de verilmektedir. Malzeme durumlarının karşılaştırılması için ankastre - sabit mesnetli kiriş ele alınmıştır. Ele alınan kirişin geometrik özellikleri, malzeme mekanik özellikleri ve yükleme durumları önceki örnekler ile aynı alınmıştır.

Şekil 11 incelendiğinde ise malzeme fonksiyonlarının dinamik davranış sonuçlarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Örneğin $e_0 = 0.1$ değeri için simetrik malzemeli kirişin yer değiştirmeleri en küçük değerleri alırken yine aynı malzeme $e_0 = 0.9$ için diğer iki malzeme fonksiyonuna göre en büyük değerleri almaktadır. $e_0 = 0.5$ için

elde edilen sonuçlara bakıldığında ise monolitik ve üniform malzeme fonksiyonlarının sonuçları birbiriyle örtüşürken simetrik malzeme durumu için elde edilen düşey deplasmanlar daha küçük değerler almaktadır.



Şekil 11. A – S Mesnetli Kiriş İçin Malzeme Değişimine Göre Düşey Deplasman Değişimi

SONUÇLAR

Bu çalışmada, FDG malzemeden yapılmış sandviç kirişlerin elastik ve viskoelastik zorlanmış titreşim davranışı teorik olarak incelenmiştir. Üç tabakadan oluşan sandviç kirişin alt ve üst katmanı izotropik homojen ve çekirdek tabakası ise gözenekli malzemeli olarak modellenmiştir. Modellen kirişlerin sonlu elemanlar metodu ile analiz edilebilmesi için ANSYS programı kullanılmıştır. Bu çalışmanın en önemli sonuçları şöyle özetlenebilir.

- Üniform, simetrik ve monolitik gözenekli malzeme durumları için porozite katsayısı arttıkça yer değiştirme ve dönme sonuçları için titreşim genlik değerlerinin ve titreşim periyotlarının arttığı görülmüştür.
- Sınır koşulları açısından karşılaştırma ise, titreşim genlik değerleri ankastre – ankastre, ankastre–sabit ve ankastre – serbest mesnetler için küçükten büyüğe doğru sıralanabilir.
- Malzeme dağılım fonksiyonlarının karşılaştırılması sonucunda ise $e_0 = 0.1$ porozite katsayısı için elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.
- $e_0 = 0.3$ katsayısı için ise monolitik malzeme fonksiyonun sonuçları en büyük değerleri alırken simetrik gözeneklik dağılımı için elde edilen sonuçlar en küçük değerleri almaktadır.
- $e_0 = 0.5$ durumu için elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ise monolitik ve üniform malzeme fonksiyonları için elde edilen değerlerinin yakın olduğu ve simetrik malzeme durumu için elde edilen sonuçların diğer malzeme durumlarına göre daha küçük değerler aldığı gözlemlenmiştir.
- $e_0 = 0.9$ durumunda ise en büyük değerlerin simetrik malzeme durumunda olduğu ve en küçük değerlerinin ise monolitik malzeme durumunda olduğu ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

Ai, Q., & Weaver, P. M. (2016). Simplified analytical model for tapered sandwich beams using variable stiffness materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 19(1), 3-25. <https://doi.org/10.1177/1099636215619775>

Ait Atmane H., Tounsi A., & Bernard, F. (2017). Effect of thickness stretching and porosity on mechanical response of a functionally graded beams resting on elastic foundations. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 13, 71-84. <https://doi.org/10.1007/s10999-015-9318-x>

Akbas Ş. D. (2015). Free vibration and bending of functionally graded beams resting on elastic foundation. *Res. Eng. Struct. Mat.*, vol. 1, no. 1, pp. 25–37, 2015. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2015.03st0107>

Akbaş, Ş. D. (2018). Forced vibration analysis of functionally graded porous deep beams. *Composite Structures*, 186, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.013>

Al Rjoub, Y.S., & Hamad, A.G(2017). Free vibration of functionally Euler-Bernoulli and Timoshenko graded porous beams using the transfer matrix method. *KSCE J. Civ. Eng.* 21, 792–806. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0149-6>

Al-Itbı, S. K., & Noori, A. R. (2022). Influence of porosity on the free vibration response of sandwich functionally graded porous beams. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 7(4). <https://doi.org/10.47481/jscmt.1165940>

Alshorbagy E.A. , Eltahaer A.M., & Mahmoud F. F. (2011) Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method, *Appl. Math. Model.*, vol. 35, no. 1, pp. 412–425. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.006>

Amirani, M. C., Khalili, S. M. R., & Nemati, N. (2009). Free vibration analysis of sandwich beam with FG core using the element free Galerkin method. *Composite structures*, 90(3), 373-379. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.03.023>

Aydogdu M. (2008). Semi-inverse method for vibration and buckling of axially functionally graded beams. *J. Reinf. Plast.Compos.*, vol. 27, no. 7, pp. 683–691. <https://doi.org/10.1177/0731684407081369>

Aydogdu M., & Taskin V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Mater. Des.*, vol. 28, no. 5, pp. 1651–1656. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.007>

Aydogdu M., Maroti G., & Elishakoff I. (2013). A note on semiinverse method for buckling of axially functionally graded beams. *J. Reinf. Plast.Compos.*, vol. 32, no. 7, pp. 511–512. <https://doi.org/10.1177/0731684412474999>

Bhangale R. K., & Ganesan N. (2006). Thermoelastic buckling and vibration behavior of a functionally graded sandwich beam with constrained viscoelastic core. *J. Sound Vib.*, vol. 295, no. 1–2, pp. 294–316.

Celebi K., & Tutuncu N. (2014). Free vibration analysis of functionally graded beams using an exact plane elasticity approach. *Proc. IMechE Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 14, pp. 2488–2494. <https://doi.org/10.1177/0954406213519974>

Chen D, Yang J, Kitipornchai S. (2019). Buckling and bending analyses of a novel functionally graded porous plate using Chebyshev-Ritz method. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* ;19(1):157-170. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.09.004>

Chen, D., Kitipornchai, S., & Yang, J. (2016). Nonlinear free vibration of shear deformable sandwich beam with a functionally graded porous core. *Thin-Walled Structures*, 107, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.05.025>

- Chu P., X.F. Li, Wu J.X., & Lee K.Y. (2015). Two-dimensional elasticity solution of elastic strips and beams made of functionally graded materials under tension and bending, *Acta Mech.* vol. 226, no. 7, pp. 2235–2253. <https://doi.org/10.1007/s00707-014-1294-y>
- Daikh, A.A., & Zenkour, A.M. (2019). Free vibration and buckling of porous power-law and sigmoid functionally graded sandwich plates using a simple higher-order shear deformation theory. *Materials Research Express.* 6(11):115707. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab48a9>
- Daouadji T. H., Henni A. H., Tounsi A., & El Abbas A. B. (2013). Elasticity solution of a cantilever functionally graded beam. *Appl. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10443-011-9243-6>
- Das, S., & Sarangi, S. K. (2016, September). Static analysis of functionally graded composite beams. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 149, No. 1, p. 012138). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/149/1/012138>
- Ding, D.H., Huang, D.J., & Chen, W.Q. (2007). Elasticity solutions for plane anisotropic functionally graded beams. *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, no. 1, pp. 176–196. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.04.026>
- Ebrahimi, F., Ghasemi, F., & Salari, E. (2016). Investigating thermal effects on vibration behavior of temperature-dependent compositionally graded Euler beams with porosities. *Meccanica* 51, 223–249. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0208-y>
- Fouaidi, M., Jamal, M., & Belouaggadia N. (2020). Nonlinear bending analysis of functionally graded porous beams using the multiquadric radial basis functions and a Taylor series-based continuation procedure. *Composite Structures*, 252:112593. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112593>
- Gao, K., Li, R., & Yang, J. (2019). Dynamic characteristics of functionally graded porous beams with interval material properties. *Eng. Struct.* 197, 109441. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109441>
- Huang D.J., Ding D.H., & Chen W.Q.. (2007). Analytical solution for functionally graded anisotropic cantilever beam subjected to linearly distributed load. *Appl. Math. Mech.*, vol. 28, no. 7, pp. 855– 860. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.04.026>
- Huang, D.J. Ding, D.H., & Chen. W.Q. (2009) . Analytical solution and semi-analytical solution for anisotropic functionally graded beam subject to arbitrary loading. *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, vol. 52, no. 8, pp. 1244–1256. <https://doi.org/10.1007/s11433-009-0152-8>
- Jabbari M., Mojahedin A., Khorshidvand A.R., & Eslami M.R. (2014). Buckling Analysis of a Functionally Graded Thin Circular Plate Made of Saturated Porous Materials. *Journal of Engineering Mechanics*,140(2):287-295. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000663](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000663)
- Jamshidi M, Arghavani J, & Maboudi G. (2019). Post-buckling optimization of two-dimensional functionally graded porous beams. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*,15(4):801-815. <https://doi.org/10.1007/s10999-019-09443-3>
- Kiani Y., & Eslami M. R. (2010). Thermal buckling analysis of functionally graded material beams. *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 6, no. 3, pp. 229–238. <https://doi.org/10.1007/s10999-010-9132-4>
- Kiani Y., & Eslami M. R. (2013). Thermomechanical buckling of temperature dependent FGM beams. *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 10, no. 2, pp. 223–246. <https://doi.org/10.1590/S1679-78252013000200001>

- Kim N., & Lee J. (2016). Theory of thin-walled functionally graded sandwich beams with single, and double-cell sections. *Compos. Struct.*, vol. 157, pp. 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.024>
- Kim N., & Lee J. (2017). Flexural-torsional analysis of functionally graded sandwich I-beams considering shear effects. *Compos. Part B-Eng.*, vol. 108, pp. 436–450. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.092>
- Liu Z., Yang C., Gao W., Wu D., & Li G. (2019). Nonlinear behaviour and stability of functionally graded porous arches with graphene platelets reinforcements. *International Journal of Engineering Science*, 137:37-56. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.12.003>
- Mojahedin A., Jabbari M., Khorshidvand A.R., & Eslami M.R. (2016). Buckling analysis of functionally graded circular plates made of saturated porous materials based on higher order shear deformation theory. *Thin-Walled Structures*; 99:83-90. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.11.008>
- Naderi A., & Saidi. A.R. (2013). Bending–stretching analysis of moderately thick functionally graded anisotropic wide beams. *Arch. Appl. Mech.*, vol. 83, no. 9, pp. 1359–1370. <https://doi.org/10.1007/s00419-013-0751-8>
- Njim, E. K., Bakhi, S. H., & Al-Waily, M. (2022). Experimental and numerical flexural properties of sandwich structure with functionally graded porous materials. *Engineering and Technology Journal*, 40(01), 137-147. <https://doi.org/10.30684/etj.v40i1.2184>
- Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2018). Damped transient response of in-plane and out-of-plane loaded stepped curved rods. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s40430-017-0949-8>
- Noori A. R., Rasooli H., Aslan T. A., & Temel B. (2020). Fonksiyonel derecelenmiş sandviç kirişlerin tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile statik analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(4), 1091-1102. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.869180>
- Noori, A. R., Aslan, T. A., & Temel, B. (2020). Static analysis of FG beams via complementary functions method. *European Mechanical Science*, 4(1), 1-6. <https://doi.org/10.26701/ems.590864>
- Rezaiee-Pajand, M., Masoodi, A. R., & Mokhtari, M. (2018). Static analysis of functionally graded non-prismatic sandwich beams. *Adv. Comput. Des*, 3(2), 165-190. <https://doi.org/10.12989/acd.2018.3.2.165>
- Sankar, B. V. (2001). An elasticity solution for functionally graded beams. *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 5, pp. 689–696. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00007-0)
- Srikarun, B., Songsuwan, W., & Wattanasakulpong, N. (2021). Linear and nonlinear static bending of sandwich beams with functionally graded porous core under different distributed loads. *Composite Structures*, 276, 114538. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114538>
- Su J., Xiang Y., Ke L-L., & Wang Y-S. (2019). Surface effect on static bending of functionally graded porous nanobeams based on Reddy's Beam Theory. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*. 19(06):1950062 <https://doi.org/10.1142/S0219455419500627>
- Şimşek M., & Al-Shujairi M. (2017) Static, free and forced vibration of functionally graded (FG) sandwich beams excited by two successive moving harmonic loads. *Compos. Part B-Eng.*, vol. 108, pp. 18–34, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.098>

- Turan, M. (2022). Fonksiyonel derecelendirilmiş gözenekli kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle statik analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10(4), 1362-1374. <https://doi.org/10.21923/jesd.1134356>
- Turan, M., & Adiyaman, G. (2023). Free vibration and buckling analysis of porous two-directional functionally graded beams using a higher-order finite element model. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-20. <https://doi.org/10.1007/s42417-023-00898-5>
- Turan M., & Kahya V. (2021). Free vibration and buckling analysis of functionally graded sandwich beams by Navier's method. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 36, 743–75. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.599928>
- Turan, M., Uzun Yaylacı, E., & Yaylacı, M. (2023). Free vibration and buckling of functionally graded porous beams using analytical, finite element, and artificial neural network methods. *Archive of Applied Mechanics*, 93(4), 1351-1372. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02332-w>
- Venkataraman S., & Sankar B.V. (2003). Elasticity solution for stresses in a sandwich beam with functionally graded core, *AIAA J.*, vol. 41, no. 12, pp. 2501–2505. <https://doi.org/10.2514/2.6853>
- Vo T. P., Thai H. T., Nguyen T. K. & Inam F. (2014). Static and vibration analysis of functionally graded beams using refined shear deformation theory. *Meccanica*, 49, 155-168. <https://doi.org/10.1007/s11012-013-9780-1>
- Wattanasakulpong N., & Chaikittiratana A. (2015). Flexural vibration of imperfect functionally graded beams based on Timoshenko beam theory: Chebyshev collocation method. *Meccanica* 50, 1331–1342. <https://doi.org/10.1007/s11012-014-0094-8>
- Wattanasakulpong, N., & Eiadtrong, S. (2022). Transient Responses of Sandwich Plates with a Functionally Graded Porous Core: Jacobi–Ritz Method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2350039. <https://doi.org/10.1142/S0219455423500396>
- Xu Y., Yu T., & Zhou D., Two-dimensional elasticity solution for bending of functionally graded beams with variable thickness. *Meccanica*, vol. 49, no. 10, pp. 2479–2489, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11012-014-9958-1>
- Ying J., Lu C.F., & Chen W.Q.. (2008). Two-dimensional elasticity solutions for functionally graded beams resting on elastic foundations. *Compos. Struct.*, vol. 84, no. 3, pp. 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.07.004>
- Zhao, J., Wang, Q., Deng, X., Choe, K., Xie, F., & Shuai, C. (2019). A modified series solution for free vibration analyses of moderately thick functionally graded porous (FGP) deep curved and straight beams. *Composites Part B: Engineering*, 165, 155-166. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.080>
- Zhong Z., & Yu T. (2007). Analytical solution of a cantilever functionally graded beam. *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 3–4, pp. 481–488, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.023>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.07.2023
Kabul Tarihi : 13.09.2023

Received Date : 11.07.2023
Accepted Date : 13.09.2023

HİJYENİK PEDLERİN CİLT TABAKASINA UYGUN DOKUSUZ YÜZEYLERİN KONFOR BİLEŞENLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATING COMFORT COMPONENTS OF NON-WOVEN SURFACES SUITABLE FOR THE SKIN LAYER OF SANITARY PADS

Gizem Ceylan TÜRKOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0001-5809-0916)
Nazlı ÜREN¹ (ORCID: 0000-0003-4487-7800)

¹ Dokuz Eylül Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gizem Ceylan TÜRKOĞLU, gizem.turkoglu@deu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, rejenere selüloz esaslı ürünlerin, hijyenik pedlerin cilde temas eden üst tabakasında kullanılabilirliğine yönelik karakterizasyon çalışmaları rapor edilmiştir. Bu amaçla %100 viskoz, viskoz/poliester karışımı ve %100 Tencel içerikli, su jeli ile birleştirilmiş apertüresiz beş farklı dokusuz yüzey seçilmiştir. Seçilen dokusuz yüzeylerin metrekaare ağırlıkları 42 -72 g/m² aralığında değişmektedir. Numunelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği özellikleri sırasıyla 856-2079 mm/s ve su buharı geçirgenliği 724-767 g/m²/gün aralığındadır. Gerçekleştirilen kuruma süresi testine göre %100 viskoz içeren dokusuz yüzeylerin iki saatin sonunda ilk ağırlığına ulaştığı belirlenmiştir. Çok çeşitli tekstil yüzeylerinin dokusal konforunun analizi amacıyla geliştirilen yeni bir ölçüm cihazı olan Tactile Sensation Analyzer ile dokusuz yüzeylerin yüzey yapısı ve düşük yük mekanik özellikleri değerlendirilmiştir. Viskoz/poliester (50/50) karışımli dokusuz yüzeyin en düşük rijitliğe sahip örnek olduğu saptanmıştır. Dokusuz yüzeylerin mikro ve makro yüzey varyasyonu değerleri arasında ise anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Mevcut araştırmanın çıktıları göz önüne alındığında, düşük birim alan kütlesi ve kalınlıkta üretilen viskoz ve viskoz/poliester karışımli dokusuz yüzeylerin hijyenik pedlerin üst tabaka uygulamalarında daha yüksek konfor sağlayabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dokusuz yüzeyler, Tactile Sensation Analyzer, yüzey pürüzlülüğü, duyuusal konfor

ABSTRACT

In this study, characterization studies on the usability of regenerated cellulose-based products on the skin-contacting top layer of sanitary pads were reported. For this purpose, five different spunlace nonwovens with 100% viscose, viscose/polyester blend and 100% Tencel content, having no aperture, were selected. The square meter weights of the selected nonwovens vary between 42 -72 g/m². The air permeability and water vapor permeability properties of the samples range between 856-2079 mm/s and 724-767 g/m²/day, respectively. According to the drying time test performed, it was determined that the nonwovens containing 100% viscose reached their initial weight after two hours. Surface structure and low-stress mechanical properties of nonwovens were evaluated with Tactile Sensation Analyzer which is a novel instrument developed to analyze tactile comfort of various textiles. It was detected that the viscose/polyester (50/50) blended sample has the lowest rigidity. No significant difference was observed between micro and macro surface variations of nonwovens. Considering the outputs of the current research, it was concluded that viscose and viscose/polyester blend nonwovens produced with low mass per unit area and thickness could provide higher comfort in top layer applications of sanitary pads.

Keywords: Nonwovens, Tactile Sensation Analyzer, surface roughness, sensory comfort

GİRİŞ

Hijyenik pedler 1896 yılında tasarlanmış ve ticari kullanıma ilk kez Amerika Birleşik Devletleri'nde 1921 yılında başlanmıştır. Bu tarihten sonra Dünya çapında milyonlarca kadının regl günlerinde yararlandığı ve hayat konforunu artıran günlük hayatın vazgeçilmeyen bir unsuru olmuştur (Woeller & Hochwalt, 2015). Hijyenik pedler temel olarak üç tabakadan oluşmaktadır. Üst tabaka cilt ile temas eden, sıvıyı bir alt tabakaya hızla iletebilen ve aynı zamanda hava geçirgenliği özelliğine sahip tabakadır. Üst tabaka kullanıcı konforundan sorumlu olan esas bileşendir. Cildi daha temiz ve kuru tutmak için hijyenik pedin üst tabakasında apertürlü (gözenekli) ürünlerin kullanılması nem iletimi açısından avantaj sağlarken, yüzeyin daha pürüzlü olması nedeniyle kullanıcı konforu açısından istenmeyen bir özellik olabilmektedir (Hong vd., 2005). Ara tabaka yüksek emiciliğe sahiptir. İlk tasarımlarında hidrofil doğal ve rejenere selülozik liflerden oluşabildiği gibi gelişen teknoloji ile bu tabakada liflerden çok daha hızla ıslanabilen ve daha yüksek sıvı taşıyabilen süper absorban polimerlerle takviye edilmektedir (Woeller & Hochwalt, 2015; Shimomura & Namba, 1994). En alt tabaka ise genellikle petrol esaslı ürünlerden geliştirilen ve sıvıyı geçirmeyen ve iç çamaşırının kirlenmesini engelleyen tabakadır (Woeller & Hochwalt, 2015).

Dokusuz yüzeyler, geleneksel tekstillerin daha uygun fiyatlı ikameleri olarak kabul edilen, sürekli bir üretim hattında doğrudan elyaflardan üretilen tekstil ürünleridir. Bu tekstil yüzeylerinin üretiminde pamuk ve yün gibi doğal lifler, poliester, propilen ve rejenere selüloz lifleri gibi sentetik lifler, cam ve karbon gibi inorganik lifler vb. farklı hammaddeler kullanılabilir (Kalebek & Babaarslan, 2016). Rejenere selüloz lifleri yüksek emicilik, doğal hammaddeden üretilmiş ve nispeten düşük fiyatlı olmaları gibi avantajları nedeniyle hijyenik amaçla kullanılan medikal tekstil uygulamalarında öne çıkmaktadır (Avcıoğlu Kalebek & Babaarslan, 2016; Getu & Sahu, 2014; Ajmeri & Ajmeri, 2011).

Konfor alanında dokuma ve örme kumaşlar ile gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, dokusuz yüzeylerin dokusal konforunu konu edinen çalışmaların sayısı oldukça sınırlıdır ve bu çalışmalarda ağırlıklı olarak koruyucu giysilerde ve medikal önlüklerde kullanılan dokusuz yüzeylerin konfor özelliklerinin incelendiği görülmektedir (Bhuiyan vd., 2020; Eryuruk vd., 2018; Ajmeri & Ajmeri, 2011; Pause, 2003; Cho vd., 1997). Bununla beraber, geleneksel test ekipmanlarının pek çoğu öncelikli olarak dokuma kumaşların konfor özelliklerini değerlendirmek üzere tasarlandığından, dokusuz yüzeylerin incelenmesinde kullanılacak cihaz ve yöntem sayısı da oldukça sınırlıdır (Avcıoğlu Kalebek & Babaarslan, 2009; Kawabata vd., 1994). Bu sebeple, dokusuz yüzey ile çalışan araştırmacılar, objektif ölçüm yöntemleri yerine, panelistler ile gerçekleştirilen subjektif değerlendirmeleri tercih edebilmektedir. Rahma vd. (2018), hijyenik ürünler üreten bir şirket için yaptığı çalışmada, dokusal konforun değerlendirilmesi sürecinde uygulanacak prosedür ve panelist seçimi konularına açıklık getirmeyi amaçlamıştır. Hijyenik pedlerde üst tabaka olarak kullanılan dokusuz yüzeyler ile ilgili gerçekleştirilen bu çalışmada poliester, viskoz ve polipropilen içerikli beş farklı dokusuz yüzeyin dokusal konfor özellikleri incelenmiştir. Örneklerin dokusal konfor özellikleri “yumuşak, ipeksi, kaba, esnek, yapışkan” gibi terimler ile ifade edilmiş ve panelistler tarafından değerlendirilmiştir. Panelistlerin duyu değerlendirmesi oturumundan önce tekrarlı eğitim oturumları ile bilgilendirilmesinin, değerlendirme sonuçlarının tekrarlanabilirliğini arttıracığı ifade edilmiştir.

Spunlace dokusuz yüzeyler iyi konfor özelliklerine ve yapısal bütünlüğe sahiptir (Jain vd., 2018). Spunlace yüzeyin kalınlık, gözenek büyüklüğü ve lif bağlantı noktası sayısı gibi yapısal özellikleri, arzulanan mekanik özellikleri ve konforu sağlaması açısından belirleyicidir. Hong vd. (2005), tek kullanımlık bebek bezlerinin üst katmanında ye alan dokusuz yüzey kumaşların yüzey ve mekanik özelliklerini geleneksel bir konfor ölçüm sistemi olan Kawabata değerlendirme sistemi (KES-F) ile ölçülmüştür. Aşınma ve su alımındaki artış ile beraber yüzey ve mekanik özelliklerde gözlemlenen değişimler de kaydedilmiştir. Çalışmada pamuklu ve Tencel spunlace dokusuz yüzeylerin yanı sıra iki farklı yöntem ile birleştirilmiş ve yüzey aktif madde ile hidrofilliği artırılmış polipropilen (PP) dokusuz yüzeyler değerlendirilmiştir. Sayısal bulgular, incelenen PP yüzeylerden bir tipin daha düşük sürtünme katsayısına sahip olduğunu, aşınmaya dayanıklı olduğunu ve çok hızlı kurduğunu ortaya koymuştur. Bununla beraber, çalışmada kapsamında incelenen tüketici tercihlerine bakıldığında, tüketicilerin selüloz içerikli yüzeyleri tercih ettiği ifade edilmiştir.

Selüloz esaslı dokusuz yüzeyler çevre dostu ve biyo-koruyucu materyallerdir. Selülozik liflerden üretilmiş yüzeylerin kullanılması aynı zamanda çevre kirliliğine sebep olan mikro plastik atığının da azaltılmasında rol oynamaktadır (Deng vd., 2022). Bu lifler aynı zamanda yüksek konfor özellikleri ile de tercih sebebidir (Liu vd., 2022; Atasagun & Kara, 2022; Avcıoğlu Kalebek & Babaarslan, 2016). Bu çalışmada, hijyenik pedlerde üst tabaka olarak kullanılacak spunlace dokusuz yüzeylerin konfor özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışmada, rejenere selülozik

lifler ve poliester ile karışımından elde edilen dokusuz yüzeyler incelenmiştir. Dokusuz yüzeylerin birim alan kütlesi, kalınlığı, su buharı geçirgenliği, hava geçirgenliği ve kuruma süresi gibi özellikleri laboratuvar testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, ürünlerin yüzey özellikleri ve düşük yük mekanik özellikleri, çok çeşitli tekstil yapılarının dokusal konfor bileşenlerini ölçmek amacıyla geliştirilmiş yeni bir test cihazı olan Tactile Sensation Analyzer (TSA) ile incelenmiştir.

MALZEME VE YÖNTEM

Malzeme

Çalışmada cilde temas edecek tabaka olarak kullanılacak beş farklı dokusuz yüzey Mogul Tekstil (Gaziantep, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan tekstil yüzeylerinin temel özellikleri Tablo 1’de belirtilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Dokusuz Yüzeylerin Özellikleri

Numune Kodu	Kullanılan Lif/Polimer	Dokusuz Yüzey Tekniği	Yüzey Özelliği
T	%100 Liyosel (Tencel)	Su Jetli (Spunlace) Dokusuz Yüzey	Apertürsüz
V1	%100 Viskoz*		
V2	%100 Viskoz*		
VP1	%50 Viskoz %50 Poliester		
VP2	%70 Viskoz %30 Poliester		

*V1 ve V2 numunelerinin yapısal özellikleri (birim alan kütlesi ve kalınlık) arasında farklılık bulunmaktadır.

Test ve Analizler

Bu çalışmada hijyenik pedlerin cilt tabakasına uygun dokusuz yüzeylerin yapısal özellikleri (birim alan kütlesi, kalınlık) ve geçirgenlik ve nem iletim özellikleri (su buharı geçirgenliği, hava geçirgenliği, kuruma süresi), yüzey yapısı ve düşük yük mekanik özellikleri (deformasyon, geri dönüş vb.) laboratuvar testleri ile incelenmiştir. Tüm ölçümler TS EN ISO 139/A1 standardında belirtildiği şekilde standart atmosfer koşullarında ve kondisyonlu numuneler ile gerçekleştirilmiştir.

Birim Alan Kütlesi ve Kalınlık

Dokusuz yüzeylerin birim alan kütlesi TS EN 12127 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Dokusuz yüzeylerin kalınlığı dairesel baskı ayağına sahip James Heal R&B kumaş kalınlık ölçeri ile belirlenmiştir. Baskı ayağının yüzey alanı 100 mm² ve kalınlık ölçümü için numuneye uygulanan basınç 5 gf/cm²’dir. Her tip için beş adet ölçüm yapılmıştır.

Su Buharı Geçirgenliği

Dokusuz yüzeylerin su buharı geçirgenliği özellikleri, BS 7209:1990 Specification for water vapour permeable apparel fabrics standartına uygun şekilde SDL ATLAS marka M261 model cihazı ile test edilmiştir. Test süresi 5 saat olarak belirlenmiştir. Su buharı geçirgenliği Eşitlik 1’e göre g/m²/gün birimi cinsinden hesaplanmıştır. En az üç ölçümden elde edilen ortalama, standart sapma (SS) ve %95 güven aralığına göre standart hata (SH) değerleri hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Su Buharı Geçirgenliği} = \frac{\text{Ağırlık Kaybı}}{\text{Test Alanı}} \times 100 \quad (1)$$

Hava Geçirgenliği

Dokusuz yüzeylerin hava geçirgenliği özellikleri, TS EN ISO 9073-15 standardına uygun olarak Textest FX 3300 Air Permeability Tester III cihazında belirlenmiştir. Deneylerde 20 cm² cihaz başlığı kullanılmış ve 100 Pa hava basıncı altında çalışılmıştır. Hava geçirgenliği birimi mm/s cinsinden kaydedilmiştir. Beş ön ve beş arka yüzeyden olmak üzere toplam on ölçümün ortalama, standart sapma (SS) ve %95 güven aralığına göre standart hata (SH) değerleri hesaplanmıştır.

Kuruma Süresi

Hijyenik pedlerin cilde temas edecek yüzeyinin sıvı ile temas sonrası zamana göre kuruma davranışı Cıvıllı Duru ve Candan (2016) tarafından kullanılan yöntemin temel prensibi esas alınarak değerlendirilmiştir. Buna göre 5 cm x 5 cm boyutlarında kesilen dokusuz yüzeylere Pastör pipeti yardımıyla $0,14 \pm 0,03$ mL distile su damlatılmış ve belirlenen aralıklarda hassas terazi yardımıyla ölçüm yapılmıştır. Ölçümler numunelerin ön yüzü yukarıda olacak şekilde ve en az beş tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kuruma hızı, örneğin yapısında bulunan su miktarının başlangıç anındaki su miktarına oranı (%) şeklinde ile ifade edilmiştir.

Yüzey Özellikleri

TSA kumaşların dokusal konforunun analizi amacı ile geliştirilmiş yeni bir test cihazıdır. TSA cihazı kumaşların yüzey özelliklerini özgün bir ses analizi yöntemi kullanarak ölçer. Ölçüm için test numunesi dairesel bir çerçeveye sabitlenir ve TSA cihazının ölçüm başlığı numune üzerinde 100 mN kuvvet etkisi altında rotasyon hareketi gerçekleştirir. Bu rotasyon hareketi sırasında belli frekans aralıklarında gözlemlenen iki tepe noktasındaki ses şiddetleri (TS7 ve TS750) cihaz tarafından kaydedilir. TSA tarafından ölçülen TS7 ve TS750 parametreleri sırasıyla mikro yüzey varyasyonlarını ve makro yüzey varyasyonlarını ifade etmektedir. Çalışma kapsamında TSA cihazı ile gerçekleştirilen ölçümlerde numuneler ön yüzünden ve her tip için beş farklı numune kullanılarak test edilmiştir.

Düşük Yük Mekanik Özellikler

Yüzey-dışı deformasyon ve geri dönüş özellikleri TSA cihazı ile ölçülmüştür. Dairesel bir çerçeveye sabitlenmiş numune, cihazın ölçüm başlığının hareketi ile düşey doğrultuda deforme edilmekte ve 600 mN yüke ulaşıldığı anda kumaşta oluşan deformasyon miktarı (D) kaydedilmektedir. Aynı numune ikinci kez aynı eşik yük değerine ulaşıncaya kadar deforme edildiğinde gözlemlenen deformasyon miktarı ise elastisite (E) olarak kaydedilmektedir. Deformasyon sonrasında kaydedilen geri dönüş enerjisi ve numune üzerinde kalan deformasyon miktarı ise sırasıyla histeresiz (H) ve plastisite (P) olarak ifade edilir. Ölçümler ön yüzden ve beş tekrar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

İstatistik Analizler

Tüm ölçümlerin ortalama, standart sapma ve %95 güven aralığındaki standart hata değerleri hesaplanmıştır. Numuneler arasında gözlemlenen farkların anlamlılık düzeyi ANOVA tek yönlü varyans analizi testi ile ve istatistiksel olarak ilişkili alt gruplar Duncan testi ile SPSS 25 programı kullanılarak belirlenmiştir.

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Yapısal Özellikler

Çalışmada kullanılan dokusuz yüzey örneklerinin birim alan kütlesi ve kalınlık sonuçları Tablo 2’de verilmektedir. Standart sapma değerleri dikkate alındığında, numunelerin yüzey düzlemi boyunca kalınlık ve metrekare ağırlığı açısından homojen olarak üretildiği görülmektedir. En düşük gramajlı ve ince numune V1 numunesi olup, diğer numunelerin kalınlıkları (~0,5 mm) benzerdir. Metrekare ağırlığı en yüksek olan numune ise V2’dir.

Tablo 2. Çalışmada Kullanılan Dokusuz Yüzeylerin Birim Alan Kütlesi ve Kalınlık Sonuçları

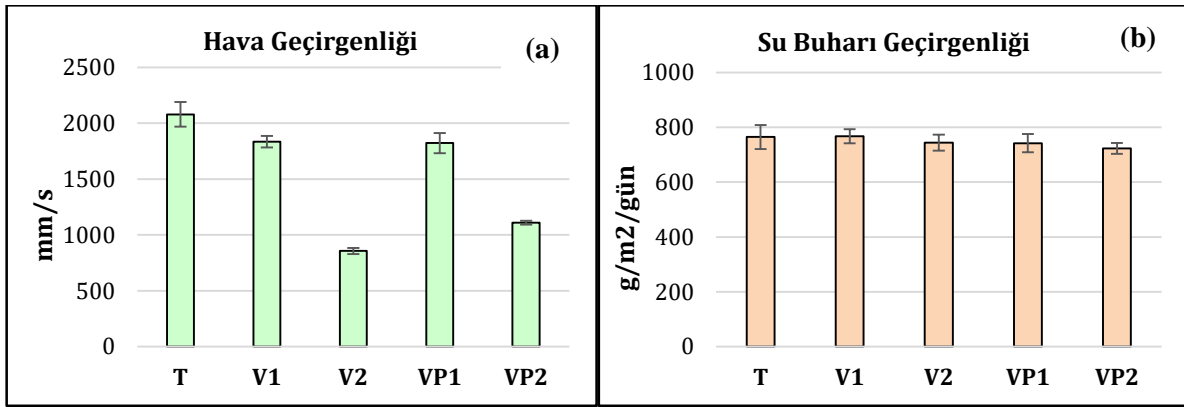
Numune Kodu	Birim Alan Kütlesi (g/m^2) \pm SS	Kalınlık (mm) \pm SS
T	$47,6 \pm 0,02$	$0,52 \pm 0,01$
V1	$42,7 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,01$
V2	$71,8 \pm 0,02$	$0,50 \pm 0,01$
VP1	$49,6 \pm 0,02$	$0,54 \pm 0,02$
VP2	$64,4 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,02$

Geçirgenlik Özellikleri

Hijyenik pedlerde hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerleri kullanıcı konforu açısından oldukça önemli özelliklerdir. Yüksek hava ve su buharı geçirgenliğine sahip örneklerin artan kullanıcı konforuna bağlı olarak günlük yaşam kalitesini artıracak ve kullanıcının satın alma kararında önemli bir etken olacak düşünülmektedir. Kara (2019) ticari bir hijyenik pedin konfor parametrelerini incelediği çalışmasında üst tabakanın hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerinin sırasıyla $1773 L/m^2/s$ (=mm/s) ve $1007 g/m^2/gün$ olduğunu belirlemiştir (Kara, 2019).

Mevcut çalışmada incelenen örneklerin hava geçirgenliği 856 ile 2079 mm/s arasında değişmektedir (Şekil 1.a). Örneklerin hava geçirgenliği değerleri arasında istatistiksel farklılık olduğu belirlenmiştir ($p=0,000$). Metrekare ağırlığı en yüksek olan V2 kodlu viskoz esaslı ürünün hava geçirgenliği ticari üründen düşük olan tek numune olup Duncan testi sonuçlarına göre birinci grupta yer almaktadır (Tablo 3). Metrekare ağırlığı olarak en yüksek ikinci numune olan VP2 ise hava geçirgenliği açısından en düşük ikinci örnek olmuştur. V1 ve VP1 örnekleri istatistiksel açıdan birbirine benzerdir. En yüksek hava geçirgenliğine sahip ürünün ise Tencel esaslı ürün olduğu bulunmuştur.

Çalışmada incelenen örneklerin su buharı geçirgenliği 724 ile 767 g/m²/gün arasındadır (Şekil 1.b). Bu değerler, literatürde incelenen ticari ürünün su buharı geçirgenliği değerine göre daha düşüktür (Kara, 2019). Çalışmada, T ve V1 kodlu numuneler için daha yüksek, poliester içerikli numuneler için ise daha düşük su buharı geçirgenliği değerleri kaydedilmekle birlikte, incelenen örneklerin su buharı geçirgenliği değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p=0,165$).



Şekil 1. Dokusuz Yüzeylerin a. Hava Geçirgenliği b. Su Buharı Geçirgenliği Ölçüm Sonuçları

Tablo 3. Hava Geçirgenliği Duncan Testi Sonuçları

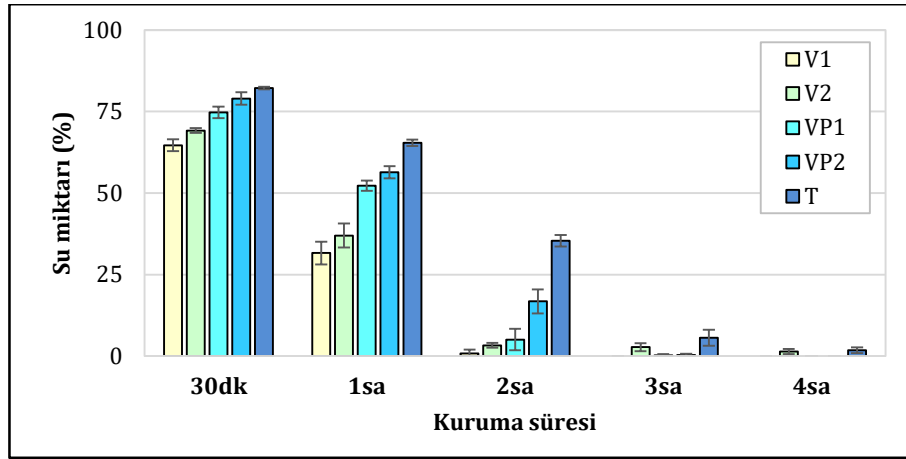
Numune	Ölçüm adedi	%95 güven aralığı için oluşturulan alt gruplar			
		1	2	3	4
V2	10	856			
VP2	10		1110		
VP1	10			1822	
V1	10			1834	
T	10				2079
<i>p</i>		1,00	1,00	0,784	1,00

*Numune kodu ile başlayan satırlarda belirtilen sayısal veriler ilgili numunenin ortalama hava geçirgenliği değeridir.

Kuruma Özellikleri

Çalışma kapsamında incelenen rejenere selüloz içerikli farklı dokusuz yüzeylerin kuruma davranışı Şekil 2'de verilmektedir. Tekstil materyalinin kuruma özellikleri hammaddenin nem tutma özellikleri ve metrekare ağırlığı ile doğrudan ilgilidir. Bunun yanı sıra sentetik liflerin lif enine kesitindeki modifikasyonlar lifin özgül yüzey alanı ve lif çapını değiştireceğinden nem iletimini de etkilemektedir (Das vd., 2018; Grudatt vd., 2010).

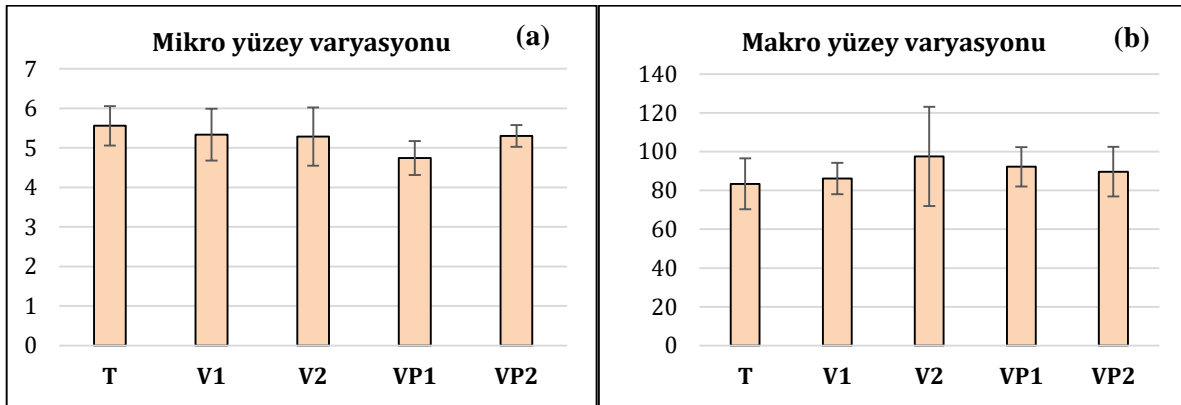
%100 viskozdan üretilmiş ürünler diğer ürünlere göre daha hızlı kuruma davranışı göstermiş olup, iki saat süre sonunda ilk ağırlığına dönmüştür. V2 kodlu ürünün V1 kodlu ürüne göre daha yavaş kuruması metrekare ağırlığının daha yüksek oluşu ile ilişkilendirilmiştir. İçeriğinde farklı oranlarda poliester olan ürünler yalnızca viskoz içeren dokusuz yüzeylere göre daha yavaş kuruma davranışı göstermiştir. %100 Tencel ile üretilmiş dokusuz yüzey ise daha yavaş kuruma eğiliminde olup dört saatin sonunda ilk ağırlığına ulaşmıştır. Viskoz liflerinin enine kesiti çiçek şeklinde düzensiz tırtıklı kenarlara sahipken ve Tencel liflerinin enine kesiti viskoza göre daha düzgün ve küresele yakındır (Türkoğlu vd., 2021). Viskoz liflerinin enine kesitindeki girintili yapının nem iletimine katkı sağladığı ve bu nedenle daha hızlı kuruduğu düşünülmektedir.



Şekil 2. Dokusuz Yüzeylerin Kuruma Hızı

Yüzey Özellikleri

Numunelerin TSA cihazı ile belirlenen mikro yüzey varyasyonu (TS7) değerleri ve makro yüzey varyasyonu (TS759) değerleri incelendiğinde, numuneler arasında yüzey varyasyonu bakımından anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür (Şekil 3) (sırasıyla, $p=0,089$ ve $p=0,428$).



Şekil 3. Dokusuz Yüzeylerin a. Mikro Yüzey Varyasyonu (TS7) b. Makro Yüzey Varyasyonu (TS750) Sonuçları

Düşük Yük Mekanik Özellikler

Tekstillerin düşük yük mekanik özellikleri, konfor ile yüksek ilişkili kavramlardır. TSA cihazında ölçülen D ve E parametreleri, numunenin yüzey dışı yük altında deforme olabilme yeteneğini ifade etmektedir. Düşük yük altında kolay deforme olabilen tekstiller, kullanım esnasında kişiye daha konforlu bir his sunmaktadır. Bu bakımdan D ve E parametrelerinin dokusal konfor ile doğru orantılı olması beklenmektedir.

Tablo 4. TSA ile Ölçülen Deformasyon Parametresi (D) İçin Duncan Testi Sonuçları

Numune	Ölçüm adedi	%95 güven aralığı için oluşturulan alt gruplar			
		1	2	3	4
V2	5	2,07			
VP2	5	2,13			
V1	5		2,30		
T	5			2,47	
VP1	5				2,71
<i>p</i>		0,176	1,00	1,00	1,00

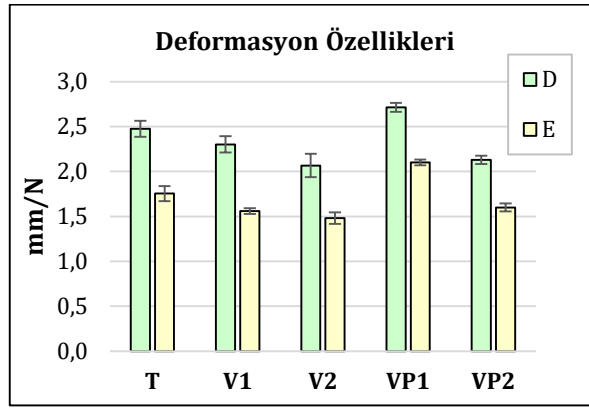
*Numune kodu ile başlayan satırlarda belirtilen sayısal veriler ilgili numunenin ortalama deformasyon değeridir.

İncelenen dokusuz yüzeylerin deformasyon (D) değerleri 2,1 ile 2,7 mm/N arasındadır ve numunelerin D değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır ($p=0,000$). V2 ve VP2 kodlu numuneler Duncan testi sonucuna göre aynı grupta yer almaktadır ve en az deforme olabilen örneklerdir (Tablo 4). VP1 numunesi ise en çok deforme olabilen numune olarak 4. grupta yer almaktadır.

Tablo 5. TSA ile Ölçülen Deformasyon Elastisite Parametresi (E) İçin Duncan Testi Sonuçları

Numune	Ölçüm adedi	%95 güven aralığı için oluşturulan alt gruplar			
		1	2	3	4
V2	5	1,48			
V1	5		1,56		
VP2	5		1,60		
T	5			1,75	
VP1	5				2,10
<i>p</i>		1,00	0,166	1,00	1,00

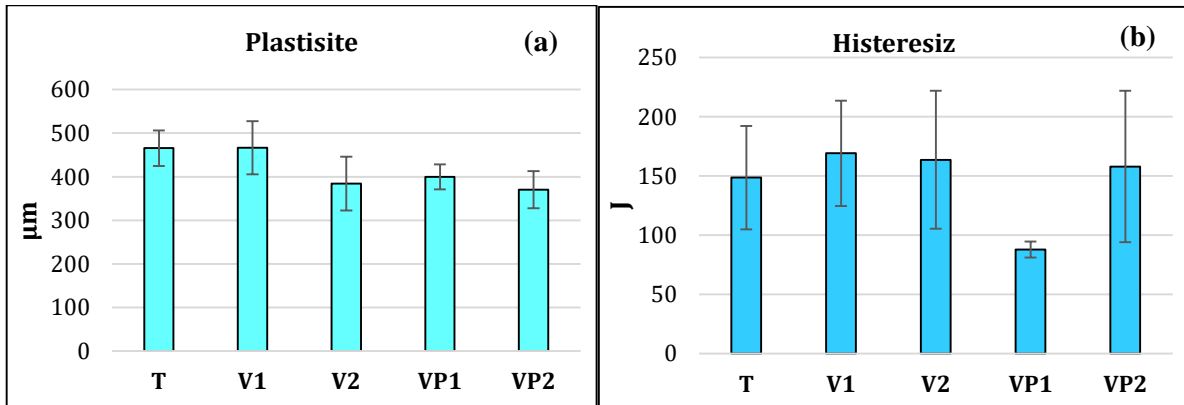
*Numune kodu ile başlayan satırlarda belirtilen sayısal veriler ilgili numunenin ortalama elastisite değeridir.



Şekil 4. Dokusuz Yüzeylerin Deformasyon (D) ve Elastisite (E) Sonuçları

Elastisite (E) parametresi aynı numunenin ikinci kez deforme edilmesinden elde edilen sonuçları göstermektedir. Çalışmada incelenen örneklerin E değerleri 1,5 ile 2,1 mm/N arasındadır. Numunelerin E değerleri arasında da istatistiksel olarak anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,000$). D parametresi bulgularına benzer şekilde, V2 kodlu numune en düşük E değerine, VP1 kodlu numune en yüksek E değerine sahip örneklerdir (Tablo 5). Örneklerin D ve E değerleri arasındaki fark yaklaşık 0,6 mm/N'dur (Şekil 4).

TSA cihazında ölçülen P ve H parametreleri, materyalin geri dönüş özellikleri ile ilişkilidir. Dokusuz yüzeylerin plastisitesini ifade eden P parametresi için kaydedilen değerler 370 ile 467 μm arasındadır (Şekil 5.a). Numunelerin plastisitesi arasında anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,001$). T ve V1 kodlu numuneler yüksek plastisiteye sahip numuneler olarak ikinci grupta yer alırken diğer numuneler birinci gruptadır (Tablo 6).



Şekil 5. Dokusuz Yüzeylerin a. Plastisite (P) ve b. Histeresiz (H) Sonuçları

Tablo 6. TSA ile Ölçülen Plastisite Parametresi (P) İçin Duncan Testi Sonuçları

Numune	Ölçüm adedi	%95 güven aralığı için oluşturulan alt gruplar	
		1	2
VP2	5	370	
V2	5	384	
VP1	5	400	
T	5		466
V1	5		467
<i>p</i>		0,278	0,969

*Numune kodu ile başlayan satırlarda belirtilen sayısal veriler ilgili numunenin ortalama plastisite değeridir.

Plastisite sonuçlarına benzer şekilde, örneklerin histeresiz (H) değerleri arasında da anlamlı fark saptanmıştır ($p=0,021$) (Şekil 5.b). Duncan testi sonuçlarına göre, numunelerin H değerleri baz alındığında, VP1 kodlu numunenin diğer numunelerden ayrıldığı görülmektedir (Tablo 7).

Tablo 7. TSA ile Ölçülen Histeresiz Parametresi (H) İçin Duncan Testi Sonuçları

Numune	Ölçüm adedi	%95 güven aralığı için oluşturulan alt gruplar	
		1	2
VP1	5	87,8	
T	5		149
VP2	5		158
V2	5		164
V1	5		169
<i>p</i>		1,00	0,450

*Numune kodu ile başlayan satırlarda belirtilen sayısal veriler ilgili numunenin ortalama histeresiz değeridir.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında hijyenik pedlerin cilde temas eden üst tabakasında kullanılan rejenere selülozik lif içeren farklı dokusuz yüzeylerin konfor bileşenleri araştırılmıştır. Bu amaçla su jeti ile birleştirilmiş apertürsüz beş dokusuz yüzey seçilmiştir. Tüm ürünlerin su buharı geçirgenliği özelliklerinin istatistiksel olarak benzer olduğu gözlemlenmiştir. Bulgular hava geçirgenliğinin metrekaare ağırlığı ile ters orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Dokusuz yüzeylerin kuruma hızının numune kalınlığı ile doğru orantılı olduğu belirlenmiş olup en yüksek kuruma hızının en düşük kalınlığa sahip %100 viskoz V1 kodlu yüzeye ait olduğu görülmüştür.

TSA cihazı ile yapılan ölçümlerden elde edilen bulgular, incelenen dokusuz yüzeyler arasında makro ve mikro yüzey varyasyonu değerleri açısından anlamlı bir fark olmadığını ortaya koymaktadır. Bununla beraber, viskoz/poliester (50/50) karışımı VP1 kodlu numunenin diğer numunelere kıyasla daha az rijit olduğu ve daha düşük enerji ile deformasyon öncesi haline geri gelebildiği gözlemlenmiştir. Belirtilen numune aynı zamanda, en az kalıcı deformasyona sahip üç dokusuz yüzey tipinden biridir. Bu bağlamda, düşük yük mekanik özellikler dikkate alındığında VP1 kodlu numunenin diğer örneklerden daha konforlu bir kullanım sunacağı sonucuna varılmıştır. Tüm bu değerlendirmelerin sonucunda, daha düşük birim alan kütlesi ve kalınlıkta üretilen dokusuz yüzeylerin hijyenik pedlerin üst tabakasında kullanılmasının tüm konfor parametreleri açısından avantaj sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Dokusuz yüzeylerdeki viskoz içeriği hava geçirgenliği, su buharı geçirgenliği ve kuruma hızı gibi özellikleri iyileştirirken, viskozun 50/50 oranında poliester ile karışım halinde kullanılması düşük yük mekanik özellikleri iyileştirmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmadaki iş birliği için EMTEC Electronic GmbH'ye ve dokusuz yüzey temini sırasındaki desteğinden dolayı Mogul Tekstil'e teşekkür eder.

KAYNAKLAR

Ajmeri, J. R. & Ajmeri, C. J. (2011). Nonwoven materials and technologies for medical applications. In V. T. Bartels (Ed). Handbook of Medical Textiles (pp. 106-131). Woodhead Publishing.

- Atasağun, H. G., & Kara, S. (2022). Investigation of moisture management and frictional characteristics of top layers used in disposable absorbent hygiene products. *Fibers and Polymers*, 23(9), 2577-2585. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-0032-7>
- Avcioğlu Kalebek, N., & Babaarslan, O. (2009). Evaluation of friction and stiffness behaviour of nonwovens produced with spunbond and spunlace methods. *Textile and Apparel*, 19(2), 145-150. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekstilvekonfeksiyon/issue/23634/251718>
- Avcioğlu Kalebek, N., & Babaarslan, O. (2016). Fiber selection for the production of nonwovens. In H. Y. Jean (Ed.), *Non-woven Fabrics* (pp. 1-32), InTech Open, 2016. <https://dx.doi.org/10.57722/61977>
- Bhuiyan, M. R., Wang, L., Shaid, A., Jahan, I., & Shanks, R. A. (2020). Silica aerogel-integrated nonwoven protective fabrics for chemical and thermal protection and thermophysiological wear comfort. *Journal of Materials Science*, 55, 2405-2418. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-04203-2>
- Cho, J. S., Tanabe, S. I., & Cho, G. (1997). thermal comfort properties of cotton and nonwoven surgical gowns with dual functional finish. *Applied Human Science*, 16(3), 87-95. <https://doi.org/10.2114/jpa.16.87>
- Cımillı Duru, S. & Candan, C. (2016). Wicking and drying behaviors of knitted fabrics produced with different poliamide yarns. *Textile and Apparel*, 26(3), 280-286.
- Das, B., Das, A., Kothari, V. K., Fanguiero, R., & De Araújo, M. (2008). Effect of fibre diameter and cross-sectional shape on moisture transmission through fabrics. *Fibers and Polymers*, 9, 225-231. <https://doi.org/10.1007/s12221-008-0036-y>
- Deng, C., Seidi, F., Yong, Q., Jin, X., Li, C., Zhang, X., Han, J., Liu, Y., Huang, Y., Wang, Y., Yuan, Z. & Xiao, H. (2022). Antiviral/antibacterial biodegradable cellulose nonwovens as environmentally friendly and bioprotective materials with potential to minimize microplastic pollution. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127391. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127391>
- Eryuruk, S. H., Kayaoglu, B. K., & Altay, P. (2018). Thermal comfort properties of nonwoven fabrics used in surgical gowns. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 459(1), 012039. <https://doi.org/10.2114/jpa.16.87>
- Getu, A., & Sahu, O. (2014). Technical fabric as health care material. *Biomedical Science and Engineering*, 2(2), 35-39. <https://doi.org/10.12691/bse-2-2-1>
- Gurudatt, K., Nadkarni, V. M., & Khilar, K. C. (2010). A study on drying of textile substrates and a new concept for the enhancement of drying rate. *The Journal of The Textile Institute*, 101(7), 635-644. <https://doi.org/10.1080/00405000902732776>
- Hong, K. H., Kim, S. C., Kang, T. J., & Oh, K. W. (2005). Effect of abrasion and absorbed water on the handle of nonwovens for disposable diapers. *Textile Research Journal*, 75(7), 544-550. <https://doi.org/10.1177/0040517505053856>
- Liu, M., Ma, C., Zhou, D., Chen, S., Zou, L., Wang, H., & Wu, J. (2022). Hydrophobic, breathable cellulose nonwoven fabrics for disposable hygiene applications. *Carbohydrate Polymers*, 288, 119367. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119367>
- Jain, R. K., Sinha, S. K., & Das, A. (2018). Structural investigation of spunlace nonwoven. *Research Journal of Textile and Apparel*, 22(3), 158-179. <https://doi.org/10.1108/RJTA-07-2017-0038>
- Pause, B. (2003). Nonwoven protective garments with thermo-regulating properties. *Journal of Industrial Textiles*, 33(2), 93-99. <https://doi.org/10.1177/152808303038859>
- Kara S. (2019, Kasım) A comparative study on the permeability and sensorial comfort related mechanical properties of sanitary napkin layers. In 2019 17th National 3rd International the Recent Progress Symposium on Textile Technology and Chemistry, Bursa, Türkiye.
- Kawabata, S., Niwa, M., & Wang, F. (1994). Objective hand measurement of nonwoven fabrics: Part I: Development of the equations. *Textile Research Journal*, 64(10), 597-610. <https://doi.org/10.1177/004051759406401008>
- Rahma, T., Soumaya, S., Naima, H., & Mohamed, B. H. (2018). Decision support tool for hygienic product company: Industrial tactile sensory panel analysis implementation. *Textile and Apparel*, 28(4), 294-303. <https://doi.org/10.32710/tekstilvekonfeksiyon.493093>

Shimomura, T. & Namba, T. (1994) Preparation and application of high-performance superabsorbent polymers. In F. L. Buchholz & N. A. Peppas (Eds.), *Super Absorbent Polymers Science and Technology* (pp. 112-127). American Chemical Society Publications. <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0573.ch009>

Türkoğlu, G. C., Sarıışık, A. M., & Karavana, S. Y. (2021). Development of textile-based sodium alginate and chitosan hydrogel dressings. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 70(13), 916-925. <https://doi.org/10.1080/00914037.2020.1765364>

Woeller, K.E., & Hochwalt, A.E., (2015). Safety assessment of sanitary pads with a polymeric foam absorbent core. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 73(1), 419-424. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.07.028>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.07.2023
Kabul Tarihi : 22.09.2023

Received Date : 11.07.2023
Accepted Date : 22.09.2023

QUANTUM KEY DISTRIBUTION IN SMART HOME SYSTEMS

AKILLI EV SİSTEMLERİNDE KUANTUM ANAHTAR DAĞITIMI

Nurcihan DERE¹ (ORCID: 0009-0009-6072-6990)
Eyup Emre ULKU² (ORCID: 0000-0002-1985-6461)

¹ Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Computer Engineering Department, İstanbul, Türkiye
² Marmara University, Faculty of Technology, Computer Engineering Department, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Eyup Emre ULKU, emre.ulku@marmara.edu.tr

ABSTRACT

In recent years, with the increase in the widespread use of the internet, the usage areas and the number of users have increased rapidly. Technological advances and efforts to make life easier bring innovation and transformation in many sectors. One of these innovative approaches is the use of Internet of Things (IoT) in home systems. The concept of IoT refers to the ability of objects to communicate with each other over the internet. Smart home systems stand out as systems where different devices come together work in interaction and can be controlled remotely. While this communication and integration offers various advantages, it also brings security risks. Ensuring security in IoT systems basically includes objectives such as confidentiality, integrity, and authentication. In this study, how the key used in the encryption of data transmitted between the gateway and the cloud in smart home systems can be strengthened with the B92 Quantum Key Distribution protocol is implemented through a scenario. The effect of the Quantum Key Distribution protocol in providing privacy and its advantages against man-in-the-middle attacks are emphasized in this study.

Keywords: Quantum key distribution protocols, BB84, B92, internet of things, smart home systems

ÖZET

Son yıllarda, internetin yaygın kullanımının artmasıyla birlikte kullanım alanları ve kullanıcı sayısı hızla artış göstermektedir. Teknolojik ilerlemeler ve yaşamı kolaylaştırma amacıyla yapılan çalışmalar, birçok sektörde yenilik ve dönüşümü beraberinde getirmektedir. Bu yenilikçi yaklaşımlardan biri de ev sistemlerinde Nesnelerin İnterneti (IoT) kullanımınıdır. IoT kavramı, nesnelerin internet üzerinden birbirleriyle iletişim kurabilme yeteneğini ifade eder. Akıllı ev sistemleri, farklı cihazların bir araya gelerek etkileşim içinde çalıştığı ve uzaktan kontrol edilebildiği sistemler olarak öne çıkar. Bu iletişim ve entegrasyon çeşitli avantajlar sunarken, aynı zamanda güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir. IoT sistemlerinde güvenlik sağlanması temelde gizlilik, bütünlük ve kimlik doğrulama gibi hedefleri içerir. Bu çalışmada, akıllı ev sistemlerinde gateway ile bulut arasında iletilen verilerin şifrelenmesinde kullanılan anahtarın B92 Kuantum Anahtar Dağıtım protokolü ile nasıl güçlendirilebileceği bir senaryo üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kuantum Anahtar Dağıtım protokolünün gizlilik sağlamadaki etkisi ve ortadaki adam saldırlarına karşı sunduğu avantajlar bu çalışmada vurgulanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kuantum anahtar dağıtım protokolleri, BB84, B92, nesnelerin interneti, akıllı ev sistemleri

INTRODUCTION

Internet of Things (IoT) deployments face significant security challenges due to the limited energy and computing power of IoT devices. These security issues are more serious in the age of quantum communication where attackers may have quantum computing capabilities (Al-Mohammed, Al-Ali, Yaacoub, Abualsaud, and Khattab, 2021a). Attacks that can be carried out on Internet of Things (IoT) systems can be listed as attacks on data transmitted between IoT devices and servers, attacks on software used in the IoT device, attacks that can be carried out to access this data when IoT data is stored in a cloud. Developing end-to-end secure IoT solutions involves multiple levels that combine core IoT security architecture features in 4 different layers, as shown in Figure 1. These layers are device layer, communication layer, cloud layer and lifecycle management layer (Scully). Cryptography methods are used in the IoT communication layer, as in many of systems, to ensure secure data transfer.



Figure 1. IoT Security Principles

Cryptography is all of the methods used to transform the information contained in a readable data into a form that cannot be understood by undesirable parties. The purpose of applied cryptography involves using a secret key, public key, and hash functions to ensure data confidentiality, data integrity, authentication, and non-repudiation in a secure network communication environment (Stallings & Brown, 2015).

In cryptography, symmetric or asymmetric algorithms are used to encrypt data. In symmetric encryption, the same key is used to encrypt and decrypt data. Advanced Encryption Standard (AES), Rivest Cipher 4 (RC4), and Data Encryption Standard (DES) are examples of symmetric encryption algorithms. Two different keys, public and private, are used in asymmetric encryption. Diffie–Hellman (DH) and Rivest-Shamir-Adleman (RSA) are asymmetric encryption algorithms. In these methods, which are used to ensure data confidentiality, passwords can be decrypted in a short time by quantum computers. Therefore, more secure quantum methods have been developed. While the purpose of QKD and classical key distribution are consistent, the implementation methods are different. Classical key distribution is based on the mathematical theory of computational complexity, while quantum key distribution is based on the fundamental principle of quantum mechanics (Qiao & Chen, 2009).

In today's encryption algorithms, a wide variety of mathematical techniques are used to prevent third parties listening to the line from obtaining the contents of the encrypted message, while in quantum cryptography, data is protected by the laws of physics (Toyran, 2003). In the quantum cryptography technique, Quantum Key Distribution method is used in order to transmit the key used to encrypt the message and decrypt the encrypted message reliably between the receiver and the transmitter. Quantum Key Distribution is an efficient method for sharing secure keys among a pair of remote users (Gopinath & Shyry, 2022b).

In smart home systems, the cloud layer is the layer where data from IoT devices is stored and the data is analyzed to take appropriate actions. Sensitive data stored in this layer is encrypted to protect against attackers. Confidentiality, which is important for security in smart home systems, is provided by encryption methods during data storage. Security at the communication layer is another security goal that needs to be met. Different security architectures are applied in the connection between IoT devices and the cloud. The message is transmitted in encrypted form by encryption with the public key used. This key needs to be securely created between the device and the cloud. It must be protected against man-in-the-middle attacks that can be carried out to obtain the password.

Classical encryption methods will not be able to provide full security against an attacker with quantum computing capability. More advanced quantum encryption methods should be used against such attacks. In this study, it is explained that the encryption key between IoT devices in smart home systems, and the cloud is created by quantum key distribution. Its advantages against attacks are evaluated.

Within the scope of the study, studies on quantum key distribution and quantum key distribution protocols, studies to increase security in quantum key distribution, and security studies in IoT devices were examined.

In the study of H A Al-Mohammed et al., it is explained that when attackers have the ability to perform quantum transactions, IoT devices will be insufficient to prevent significant security attacks due to their limited energy and processing capabilities. It is concluded that in IoT, Neural Network (NN) based approach to detect an attacker at the stage of quantum key distribution can achieve 99% success in detecting attackers (Al-Mohammed, Al-Ali, Yaacoub, Abualsaud, et al., 2021b).

According to the study of J Wang et al., long-term quantum resistant security of the final key can be achieved by eliminating potentially leaked key information with post-transaction-based quantum cryptography for quantum key distribution data (Wang, Zhou, Yin, and Chen, 2022).

In the study of T A Pham and N T Dang, quantum switches are created using radio-over-fiber (RoF) systems over fiber and sent from a key distribution server to IoT gateways. This system is a useful approach to deploy quantum key in 5G based IoT (Internet of Things) networks with low quantum bit error rate and high secret key rate (Pham & Dang, 2022).

According to the study of S Kuppam, B92 is more robust to an eavesdropper, with the ability to take fewer qubits than BB84 to detect an eavesdropper, potentially reducing the number of accurate measurements the eavesdropper can make (Kuppam, 2016).

In the study of E Gümüş, in the BB84 protocol, the probability of a photon being considered valid is 50%, depending on the receiver and the sender not using the same type of filter, while in the B92 protocol, this rate drops to 33%. This means that the transmission with the B92 protocol should take longer than the BB84 protocol in order to generate keys of equal length when the two protocols are compared. While the B92 protocol has a disadvantage in this respect, it gains an advantage in terms of security by providing a higher eavesdropping detection rate in "man in the middle" type attacks. Accordingly, it is understood that 40% of the bits accepted as valid in the BB84 protocol are listened to, while this rate increases to 50% in the B92 protocol (Gümüş, 2011).

In the study of X Xie and G -L Chen, encryption of the key using the Unique Code System (UQS) is examined to prevent the key from being decrypted by malicious attacks in the Quantum Key Distribution (QKD) protocol. According to this study, the Unique Code System has greatly increased security in critical systems (Xie & Chen, 2022).

According to the study of X Meng, Existing IoT systems use a relatively easy method of data encryption to secure data transmission, often referred to as lightweight cryptography. This method is at risk of being broken by quantum computers. Therefore, the IoT architecture needs to be redesigned considering the security challenges posed by quantum computers (Meng, Yu, Chen, Zhao, and Zhang, 2020).

In the study of S Sasikumar et al., the security of the QKDP simulation model, which uses a quantum system in cloud security, is used. This simulation model used a non-Abelian group-based encryption-decryption model to increase data security. The resulting keys are distributed via the quantum channel. In this simulation, the QKD protocol, No Cloning, and Heisenberg Uncertainty principles are applied, which ensures security. Secure communication in key distribution is increased with this model (Sasikumar et al., 2022).

In the study of T M Fernández-Caramés, in IoT specifically, there are five main types of IoT communications that need to be secured. These are communication between IoT nodes, communication between an IoT node and an IoT gateway, and communication between IoT gateways or edge computing devices. Communication between an IoT gateway and the cloud is ranked as communication between an IoT node and the cloud (Fernández-Caramés, 2019).

The following sections of the article are formed as follows. Quantum cryptography and Quantum Key Distribution protocols are explained. In the materials and methods section, the smart home system and quantum key distribution protocol designed in this study are explained. It is explained with a flow chart. In the result and discussion section, quantum key distribution protocols and smart home systems are evaluated in areas such as security and speed. use protocols. In the conclusion part, the method is evaluated, and the article is concluded.

QUANTUM CRYPTOGRAPHY (QUANTUM KEY DISTRIBUTION)

In quantum cryptography, quantum mechanics principles are used to securely transmit the key used to encrypt messages between the sending party and the receiving party. Quantum Key Distribution requires the existence of two communication networks between the receiver and transmitter. The first network is a quantum channel connected to the transmission of quantum random bit signals between the receiver and transmitter, the second network is a conventional channel (Al-Mohammed, Al-Ali, Yaacoub, Qidwai, et al., 2021b). These channels are shown in Figure 2. In the quantum channel, a known secure key is created between the receiver and the transmitter. The key is generated as a random bit sequence and is disposable (one time pad).

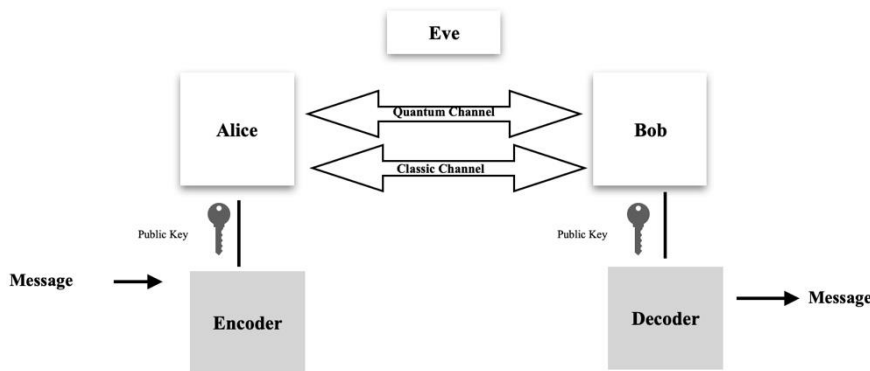


Figure 2. Quantum Key Distribution

Messages encrypted with this key are transmitted to the receiver over the classical channel. In quantum cryptography, a secure communication system can be established by using certain laws of quantum mechanics such as the Heisenberg uncertainty principle and photon polarization (Toyran, 2003). According to the Heisenberg uncertainty principle, in quantum physics, two properties (position and momentum) of an object cannot be measured at the same time (Hong, Foong, & Low, 2016), and the first measurement made for one of these properties sequentially makes the result of the second measurement uncertain.

Heisenberg's uncertainty principle is shown in Equation 1. This equation focuses on the momentum (p) and positions (x) of a quantum object. Δ represents the uncertainty and h is Planck's constant (Malik, 2021).

$$\Delta p \times \Delta x \geq h / 4\pi \quad (1)$$

In this communication, a third person trying to capture the key leaves traces on the network that will detect its presence. This is related to the Heisenberg uncertainty principle. According to the uncertainty principle introduced by Werner Heisenberg in 1927, both the position and momentum of a particle such as a photon or electron cannot be measured with perfect accuracy. More detailed experiments are required to obtain precise position information, and as these experiments are carried out, information about the momentum of the particle is gradually lost. These changes in the photon are detected in the quantum key distribution and the modified photons are cancelled. The key is created only with photons whose security is assured. Thus, quantum key distribution guarantees the confidentiality and security of the key (Gopinath & Shyry, 2022a).

Quantum Key Distribution is shown in Figure 2. In the system, the secure key is created via a quantum channel between the person who encrypts a message and sends it to the receiver (usually Alice) and the receiver (usually called Bob). The key consists of a randomly selected string of bits of sufficient length. After the secure key is created

in the quantum channel, Alice encrypts the messages using this key, and the messages are transmitted over the classical channel. Bob decrypts the encrypted message with the specified public key.

The third person (often called Eve) trying to eavesdrop on this communication tries to eavesdrop on the quantum line to get hold of the key. It measures transmitted bits while listening and causes errors. Alice and Bob can detect eavesdropping by checking the error bits. Also, even if Eve successfully eavesdropped while confirming Bob's received photons with Alice, this information would be of no use to Eve until she knew the correct polarization of each photon.

However, with today's technology, it is not possible to transmit error-free data (the "key" for quantum cryptography) over optical lines. For this reason, various key distribution protocols have been proposed for the accuracy and correction of the key transmitted over the line (Gümüş, 2011). Among these protocols, Bennett & Brassard 1984 (BB84) and Bennett 1992 (B92) protocols are mentioned in this section.

Bennett&Brassard 1984 (BB84)

The first key distribution protocol, BB84, was created by Charles Henry Bennett of IBM Research and Gilles Brassard of the University of Montreal (Zisu, 2019). For this reason, it is the most compared protocol with other protocols proposed after it in the literature (Gümüş, 2011). To create a disposable key in the BB84, the sender (Alice) and the receiver (Bob) have two crystal bases, linear (rectilinear) and diagonal, both of which make 45° angles to each other. Photon polarization states and bases are shown in Figure 3.

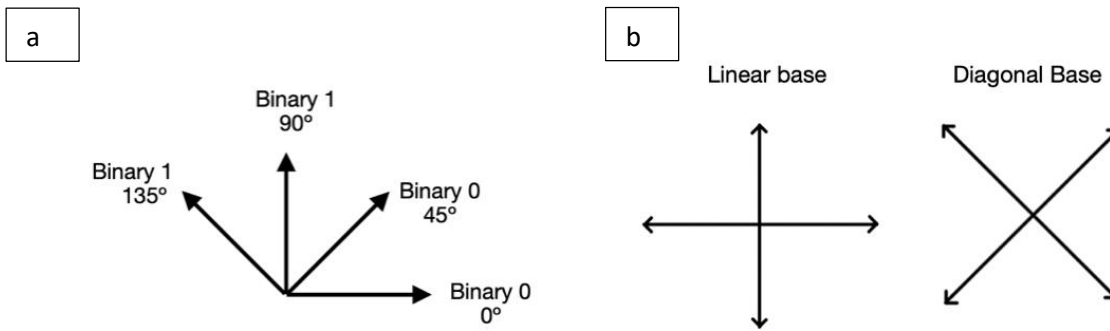


Figure 3.a. Photon Polarization States

b. Photon Bases

In the BB84 protocol, Alice and Bob communicate over the quantum channel in the first step. Alice generates a random bit sequence to generate the encryption key. Alice transmits a qubit (quantum bit) prepared on a linear or diagonal basis to Bob via a fiber optic channel, using the bits in this sequence, respectively. Alice does not share the information on which basis the qubit was prepared with the receiver (Bob). Bob chooses one of the bases (linear or diagonal) and measures, recording the base he chose and the bit he got. If the base chosen is the same as the base Alice chose, the result will be congruent and Bob will guess the bit correctly. In the second step, Alice and Bob contact again over the classical channel. Bob shares the base type he uses for each qubit with Alice. Alice then tells which of the bases Bob has chosen are correct. Accordingly, the bits where the bases are selected differently are cancelled. As a result, the bit string remaining in Alice and Bob's hands will be the same. Table 1 shows the 8-bit communication process between Alice and Bob in the BB84 protocol.

Table 1. BB84 Communication Process (Yang, Jiao, Shi, and Liu, 2019)

Bits	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Alice's Random Bits	0	1	1	0	1	0	0	1
Alice's Random Bases	+	+	x	+	x	x	x	+
Photons Alice Sends	↑	→	↘	↑	↘	↗	↗	→
Random Receiving Bases	+	x	x	x	+	x	+	+
Photons Bob Receives	↑	↗	↘	↗	→	↗	→	→
Public Discussion								
Key	0		1			0		1

Bennett 1992 (B92)

In 1992, Bennett proposed a protocol based on two nonorthogonal states for QKD. This protocol is called the B92 protocol. In the B92 quantum key distribution protocol, the Sender will encode the classical bits in two nonorthogonal states (Elboukhari, Azizi, & Azizi). Alice sends with 0° for bit 0 and 45° for bit 1. Figure 4 shows the polarization states in B92. Bob sent the sole that Alice had chosen. It applies it to the photon it is in, and if one of the states that Alice can choose (0° and 45°) comes as a result, it considers the bit invalid. It is considered valid if it achieves a degree perpendicular to the situations Alice chose. Figure 5 shows Bob's measurement and interpretation states.

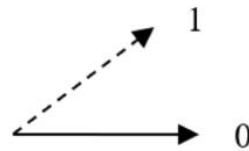


Figure 4. Sender's Nonorthogonal Polarization States (Anghel, Istrate, and Vlase, 2022)

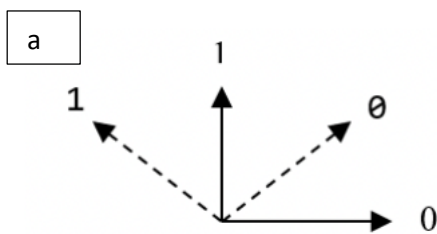
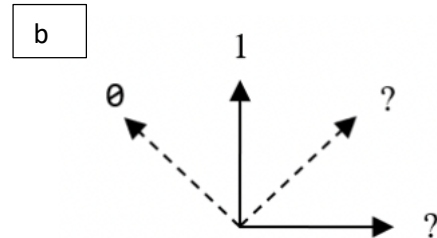


Figure 5.a. Receiver's Measurement



b. Interpretation States (Anghel, Istrate, and Vlase, 2022)

The BB84 and B92 protocols are both based on the quantum uncertainty principle. Photons with four different polarization angles are used in the BB84 protocol. After the transmission of the photons is achieved, the base alignment with the classical channel takes place. In the B92 protocol, Alice sends photons with two different type of polarization angles. After all photons have been sent, there is no base check between Alice and Bob. Bob tells Alice which qubit will remain as the key shared between them (Yang, Jiao, Shi, and Liu, 2019).

MATERIAL AND METHODS

In the designed structure, devices in smart home systems transfer data to the cloud via a wide area network (WAN) and gateway. Figure 6 shows the related smart home system structure. Gateway in this structure acts as a gate for data transmission. Data to be transferred from smart devices to the cloud is encrypted with a key to ensure confidentiality. In this model, the secure key to be used for encryption is shared between the sender and the receiver using the quantum key distribution method.

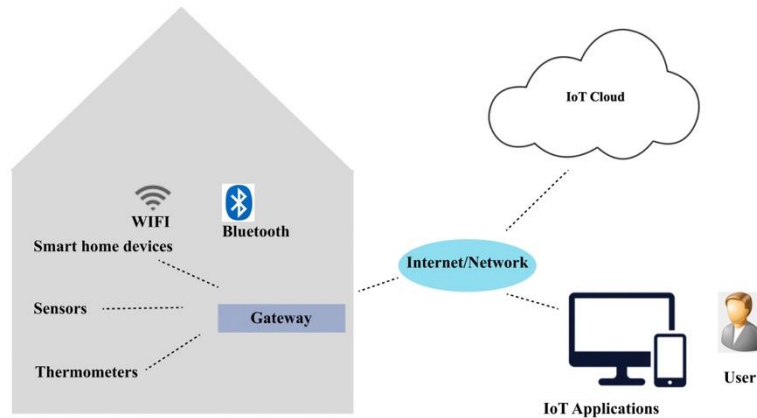


Figure 6. Smart Home System

Devices in smart home systems transmit data to the cloud through the wide area network (WAN) and gateway. The workflow of the proposed model is shown in Figure 7. The gateway in this structure functions as a gate for data transmission. Data transferred from smart devices to the gateway is encrypted with an encryption algorithm to ensure confidentiality while being transmitted from the gateway to the cloud. In this model, the secure key to be used for encryption is shared between the gateway and the cloud using the quantum key distribution method. With this shared key, data is encrypted and decrypted using conventional encryption methods. This structure was created to increase the security of smart home systems and to protect against possible security threats during data transmission.

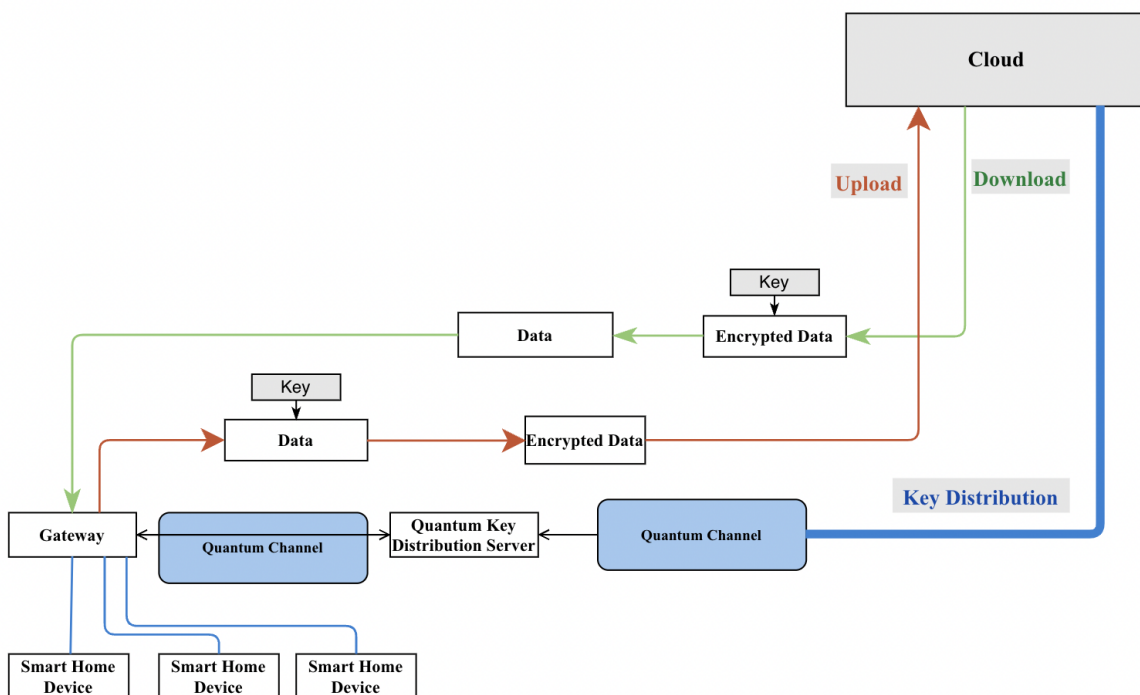


Figure 7. Workflow of the Proposed Model

The quantum key distribution scenario between the gateway and the cloud for the encryption key is as follows. To create a primary key, the communication is made with a quantum channel between the gateway and the cloud with the B92 protocol. In the first stage, the gateway randomly determines 16 bits, consisting of 0 and 1, to create a primary key. It sends these bits one by one to the gateway over the quantum channel. In this scenario, it is assumed that there is an eavesdropper listening on the communication line to obtain the primary key information. This dialog is shown in Table 2. In the table, the sending party, that is, the gateway, is named as Alice, and the receiving party as the cloud is named Bob. An eavesdropper trying to eavesdrop on the line and get the key is named Eve. Alice sends photons with linear polarization for 0° , photons with diagonal polarization for 45° . Eve captures and measures the photons, then sends the photons to Bob, maintaining the same polarization states. The presence of Eve can be detected if the measurement of Eve affects the polarization of the photons. Bob measures the transmitted photons and reports the measurement result to Alice. These bits are considered invalid if Bob gets 0° and 45° in the measurement result. It is considered valid when it finds 90° and -45° . Bob reports the measurement results back to Alice. Alice and Bob evaluate whether the communication is secure by looking at the measurement results they share among themselves. When the error and mismatch exceed the specified equal value, the entire key sequence can also be generated from scratch. (Wang et al., 2022). When the presence of an eavesdropper listening to the bit transmission is detected when the threshold value is not exceeded, that bit is canceled and the secure bits are kept. This communication is completed when 16 secure bits are obtained and the key is generated.

As seen in Table 2, the 3rd, 5th, 7th, 11th, 12th, 13th and 16th bits are considered valid in 16-bit transmission. The valid bitrate is 50%. The presence of eavesdropper (Eve) was detected in 3 out of 8 valid bits. Eavesdropper detection was also found to be 37.5% in this scenario.

RESULTS AND DISCUSSION

According to the model proposed in this article, 50% of the invalid bits are accepted for 16 bits in the B92 protocol. The presence of a potential eavesdropper trying to eavesdrop on the key distribution line was detected at 37.5% of the bits considered valid. Bits detected by the quantum key distribution protocol are considered invalid. This communication with the quantum channel continues until valid bits for the encryption key are obtained. In current applications, data transmission between the gateway and the cloud is done using classical encryption methods to ensure security in smart home systems. However, in the case of a quantum-capable attacker, these encryption methods will be easily decrypted. With the quantum key distribution methods in this study, key distribution will be performed more securely between the gateway and the cloud. With the quantum key distribution approach, smart home systems will be protected more securely against man-in-the-middle threats. In addition, once secure key sharing is achieved, it will be possible to securely encrypt and transmit data by combining keys with traditional encryption algorithms (asymmetric or symmetric). With this approach, it is aimed to create a stronger security layer by combining quantum cryptography with traditional cryptography.

When evaluated in terms of the quantum protocols to be used in key distribution, a public key can be generated faster than the B92 protocol due to the high number of valid bits in the BB84 protocol. The B92 protocol, on the other hand, is more successful in detecting an eavesdropper listening to the line. Therefore, it would be more appropriate to prefer the B92 protocol in smart home systems where security is more important and speed is relatively tolerable. On the other hand, in systems where speed is much more important and extra precautions are taken for security, the BB84 protocol can be evaluated.

Recent advances in the quantum field, like the research presented in this article, open up new possibilities for security methods in smart home systems. However, quantum technologies are still an emerging field and require complex infrastructure and hardware requirements for their use. Quantum technologies are an area that is not used on a large scale yet and has complex production and operating costs. Therefore, integrating quantum technologies into smart home systems can result in high costs. However, ongoing research and development shows that quantum technologies may find wider use in smart home systems in the future.

CONCLUSION

In this article, Quantum Key Distribution method scenario that can be used to increase the security at the communication layer in smart home systems is realized. Today, in the communication between the gateway and the cloud in smart home systems, the data is transmitted by being encrypted with classical encryption methods such as RSA, AES, DES. Among these methods, for example, in RSA, it is necessary to operate with large numbers to

increase security. However, in the age of quantum computers, these algorithms, however complex, can be solved by quantum computers in a short time. Therefore, there is a need to use quantum cryptography techniques to ensure security in IoT systems.

In this study, a quantum key distribution scenario is implemented using the B92 protocol, which uses the encryption key between the gateway and the cloud in smart home systems. In the scenario where 16 bits are transmitted, in case of an eavesdropper listening to the communication line, it was detected at a rate of 37.5% and the bits listened to according to the B92 protocol were deemed invalid. Even if the eavesdropper got a few bits by listening, they won't be able to get the whole key. Accordingly, the use of QKD compared to classical encryption methods will provide an advantage in detecting the attacker in man-in-the-middle attacks. However, practically using and integrating quantum technologies in smart home systems requires considering multiple technical, cost and security factors. Integrating quantum technologies into smart home systems requires further research and development. Studies should be carried out both for the development of quantum technologies itself and for adapting these technologies to smart home systems.

Table 2. 16 Bit Transmission With B92 Protocol

Bit Order	Alice's Bit	Alice's Photons	Eve's Selected Base	Eve's Photons Sent to Bob	Bob's Selected Base	Bob's Detected Photon	Compare Result	Bit Found by Bob	Does Eve Exist?
1	0	→	⊕	→	⊕	→	Invalid		
2	1	↗	⊗	↗	⊗	↗	Invalid		
3	1	↗	⊕	↑	⊕	↑	✓	1	No
4	0	→	⊗	↗	⊗	↗	Invalid		
5	1	↗	⊕	↑	⊗	↖	✓	0	Yes
6	0	→	⊗	↗	⊕	→	Invalid		
7	0	→	⊗	↖	⊕	↑	✓	1	Yes
8	1	↗	⊗	↗	⊕	↑	✓	1	No
9	0	→	⊕	→	⊕	→	Invalid		
10	1	↗	⊗	↗	⊗	↗	Invalid		
11	1	↗	⊕	↑	⊕	↑	✓	1	No
12	0	→	⊗	↖	⊗	↖	✓	0	No
13	0	→	⊗	↖	⊕	↑	✓	1	Yes
14	1	↗	⊕	↑	⊗	↗	Invalid		
15	1	↗	⊗	↗	⊕	→	Invalid		
16	0	→	⊕	→	⊗	↖	✓	0	No

REFERENCES

- Al-Mohammed, H. A., Al-Ali, A., Yaacoub, E., Abualsaud, K., & Khattab, T. (2021a). Detecting Attackers during Quantum Key Distribution in IoT Networks using Neural Networks. Paper presented at the 2021 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps).
- Al-Mohammed, H. A., Al-Ali, A., Yaacoub, E., Qidwai, U., Abualsaud, K., Rzewuski, S., & Flizikowski, A. (2021b). Machine learning techniques for detecting attackers during quantum key distribution in IoT networks with application to railway scenarios. *IEEE Access*, 9, 136994-137004.
- Anghel, C., Istrate, A., & Vlase, M. (2022). A Comparison of Several Implementations of B92 Quantum Key Distribution Protocol. Paper presented at the 2022 26th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC).
- Elboukhari, M., Azizi, M., & Azizi, A. Achieving unconditional security by quantum cryptography. *Intelligent Communication System*, AL-Dahoud Ali, Walid A. Salameh, Linda Smail (Eds), 36-61.
- Fernández-Caramés, T. M. (2019). From pre-quantum to post-quantum IoT security: A survey on quantum-resistant cryptosystems for the Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(7), 6457-6480.
- Gopinath, N., & Shyry, S. P. (2022a). Enhancing the cloud security using side channel attack free QKD with entangled fuzzy logic. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*(Preprint), 1-11.
- Gopinath, N., & Shyry, S. P. (2022b). Secured: quantum key distribution (SQKD) for solving side-channel attack to enhance security, based on shifting and binary conversion for securing data (SBSD) frameworks. *Soft Computing*, 1-8.
- Gümüş, E. (2011). Kuantum kriptografi ve anahtar dağıtım protokolleri. *Akademik Bilişim*.
- Hong, K. W., Foong, O.-M., & Low, T. J. (2016). Challenges in quantum key distribution: A review. Paper presented at the Proceedings of the 4th International Conference on Information and Network Security.
- Kuppam, S. (2016). Modelling and Analysis of Quantum Key Distribution Protocols, BB84 and B92, in Communicating Quantum Processes (CQP) language and Analysing in PRISM. arXiv preprint arXiv:1612.03706.
- Malik, P. (2021). A Light-based Interpretation of Schrodinger's Wave Equation and Heisenberg's Uncertainty Principle with Implications on Quantum Computation. Paper presented at the 2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS).
- Meng, X., Yu, X., Chen, W., Zhao, Y., & Zhang, J. (2020). Residual-adaptive key provisioning in quantum-key-distribution enhanced internet of things (q-iot). Paper presented at the 2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC).
- Pham, T. A., & Dang, N. T. (2022). Quantum Key Distribution: A Security Solution for 5G-based IoT Networks. Paper presented at the 2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC).
- Qiao, H., & Chen, X.-y. (2009). Simulation of BB84 Quantum Key Distribution in depolarizing channel. Paper presented at the Proceedings of 14th Youth Conference on Communication.
- Sasikumar, S., Sundar, K., Jayakumar, C., Obaidat, M. S., Stephan, T., & Hsiao, K.-F. (2022). Modeling and simulation of a novel secure quantum key distribution (SQKD) for ensuring data security in cloud environment. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 121, 102651.
- Scully, P. Understanding IoT Security – Part 1 of 3: IoT Security Architecture on the Device and Communication Layers. Retrieved from <https://iot-analytics.com/understanding-iot-security-part-1-iot-security-architecture/> Accessed 20.06.23.
- Stallings, W., & Brown, L. (2015). *Computer security principles and practice* (3 ed.). United States of America: Pearson, (Chapter 2).
- Toyran, M. (2003). *Kuantum Kriptografi*. (Yüksek Lisans Yüksek Lisans). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Wang, L.-J., Zhou, Y.-Y., Yin, J.-M., & Chen, Q. (2022). Authentication of quantum key distribution with post-quantum cryptography and replay attacks. arXiv preprint arXiv:2206.01164.

Xie, X., & Chen, G.-L. (2022). Feasibility Analysis of Quantum Key Distribution Technology in Unique Code Application. Paper presented at the 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP).

Yang, X., Jiao, J., Shi, Y., & Liu, Y. (2019). Modeling and Security Analysis Method of Quantum Key Distribution Protocol Based on Colored Petri Nets. Paper presented at the 2019 IEEE 19th International Conference on Communication Technology (ICCT).

Zisu, L. (2019). A Method to Improve the BB84 Protocol. Scientific Bulletin'Mircea cel Batran'Naval Academy, 22(1).



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :14.07.2023
Kabul Tarihi :20.09.2023

Received Date : 14.07.2023
Accepted Date : 20.09.2023

PAMUK VE VİSKON LİFLERİ KULLANARAK TEK BOYA BANYOSUNDA DEGRADE EFEKTLİ ÖRME KUMAŞ GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF GRADED-EFFECT KNITTED FABRIC IN A SINGLE DYE BATH USING COTTON AND VISCOSE FIBERS

Fatma DEMİRCİ¹ (ORCID: 0000-0002-8449-2051)
Selver Zilan ERÇOŞMAN¹ (ORCID: 0009-0007-48588869)

¹MEM Tekstil Sanayi ve Ticaret A.Ş. Ar-Ge Merkezi, Kahramanmaraş, Türkiye

Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Fatma DEMİRCİ* fatmademirci@mementextile.com

ÖZET

Dünya ve Türkiye pazarında büyük paya sahip olan tekstil sektöründe rekabetin gün geçtikçe artması, yaşam standardının yükselmesiyle birlikte müşterilerin her geçen gün farklı taleplerinin doğmasına neden olmuştur. Tekstil sektöründe en fazla kullanılan pamuk ve viskon lifler ile karışımları kullanılarak yeni ürün tasarımlarının yapılmasına ve üretim yöntemlerini bulmaya yönelmiştir. Yeni ürün tasarımlarına bakıldığında yeni hammadde kaynakları ya da mevcut ham maddelerin farklı renklendirilmeleriyle mümkün olmaktadır. Sürdürülebilir tasarımda hem estetik ve işlevsellik açısından hem de çevre açısından en uygun malzemelerin seçilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda farklı ürünler elde etmek için çeşitli boyama yöntemleri geliştirmiştir. Bu yöntemlerden birisi de degrade boyama yöntemidir. Degrade boyama yöntemi tek bir tekstil ürünü üzerine belirli aralıklar ile farklı renklerin belirli bir desene göre elde edilmesi olarak tanımlanmaktadır. Piyasada enine çizgili desenlerin renk geçişlerinin yumuşak olduğu yüzey efekti degrade efekti olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışma kapsamında pamuk ve viskon lifleri farklı karışım oranlarında kullanılarak iplikler üretilmiştir ve ardından iplik karışımlarının sıralı olarak örülmesiyle örme kumaşlar geliştirilmiştir. Bu kumaşların içeriğinde pamuk ve viskon liflerinin farklı amorf/kristalin yapılarına sahip olması su/boya alma kapasitesi farklılığından faydalanılarak tek banyoda tek adımda boyama prosesi ile degrade efekti elde edilmiştir. Elde edilen kumaşlara ait renk ve performans özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Selüloz boyama, degrade efekti, rejenere selüloz lifleri

ABSTRACT

The rapid increase in competition in the textile sector, which has a large share in the world and Turkish markets, led to the emergence of different demands of the consumer day by day with the increase in the standard of living. It led to the making of new product designs and finding production methods by using cotton and viscose fibers and their mixtures, which are the most widely used methods in the textile sector. In case of new product designs, it is possible by new raw material sources or by different coloring of existing raw materials. In sustainable design, it is necessary to choose the most suitable materials both in terms of aesthetics and functionality and in terms of the environment. In this context, various dyeing methods were developed to obtain different products. One of these methods is the gradient painting method. Gradient dyeing method is defined as obtaining different colors at certain intervals according to a certain pattern on a single textile product. In the market, the surface effect where the color transitions of the transverse striped patterns are soft is call the gradient effect. Within the scope of this study, yarns were produced by using cotton and viscose fibers in different mixing ratios, and then knitted fabrics were develop by knitting the yarn mixtures sequentially. In the content of these fabrics, cotton and viscose fibers have different amorphous/crystalline structures and a gradient effect was obtained with a single dyeing process by taking advantage of the difference in water/dye absorption capacity. Color and performance properties of the samples were investigated.

Keywords: cellulose dyeing, gradient effect, regenerated cellulosic fibers

GİRİŞ

Dünyada bulunan doğal kaynakların bilinçsiz bir şekilde kullanılması, teknolojiye meydana gelen gelişme, endüstrileşme ve hızlı nüfus artışı sonucunda kaynaklar hızla tükenmeye başlamıştır. Bu nedenle tekstil sektörünün çevresel açıdan performansının iyileştirilmesini sağlamak gerekmektedir. Bu ürün geliştirme sürecinde estetik görünüm, maliyet avantajı, mekanik dayanım ve insan sağlığı gibi parametrelerden bir ya da birkaçının artırılması amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Özellikle doğal liflerin insanların ihtiyaçlarını karşılayamaması nedeniyle son yıllarda farklı türlerde rejenere selülozik lifler üretilmeye başlanmıştır. En çok üretilen rejenere selüloz lifiyse viskondur. Viskon liflerden üretilen tekstil malzemelerinin yumuşak tutumlu ve estetik görünümüne sahip olması, işlenebilirliğinin kolaylığı, istenilen parlaklık seviyesi, diğer lif türleri ile harmanlanmaya uygun olması gibi özellikleri bu lifin önemini artırmaktadır. Viskon lifleri, pamuk ile karıştırılarak kullanılabilen gibi uygulama alanına göre tek başına da kullanılabilir. Viskon liflerinin makro moleküllerinin polimerizasyon derecesi, pamuk lifinden daha düşüktür. Bu durum bu liflerin yaş mukavemetlerinin kuru mukavemetlerinden daha düşük olmasına neden olur. Ayrıca viskon elyafının pamuk elyafına göre nem alma oranı daha yüksektir. Normal şartlarda viskon elyafı %11-14 oranında nem almakta ve şişme özelliği yüksek olduğundan %80-120'ye kadar su emebilmektedir. Viskon lifi pamuk lifinden çok daha fazla nem alma özelliğine sahip olduğundan dolayı boyamaya ve baskı işlemlerine daha elverişlidir. Aynı zamanda renklerin daha parlak ve canlı görünmesini sağlar (Gökçen & Bahadır, 2021). Bu çalışmada liflerin farklı boya alma kapasitelerinden faydalanarak pamuk ve viskon lifinden farklı karışımlarda iplikler elde edilerek sıralı olarak örme kumaş üretilmiştir. Üretilen bu kumaşların tek adımda reaktif boya ile boyanması ve aynı kumaş yüzeyinde oluşan renk geçişleri değerlendirilmiştir.

Orhan vd., tarafından yapılan çalışmada pamuk ve viskon karışımı ipliklerle elde edilen süprem ve iki iplik örme kumaşlara boyama sonrasında emdirme yöntemiyle makro ve mikro silikon yumuşatıcılar uygulanmıştır. Kullanılan makro ve mikro silikonların pamuk ve viskon esaslı örme kumaşlar üzerindeki görünüm, fiziksel ve konfor etkileri incelemek üzere renk değişimi, patlama mukavemeti, hava geçirgenliği ve ısı özellikleri test edilerek sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları, pamuk ve viskon kumaşların patlama mukavemet değerleri, her iki yumuşatıcı uygulandıktan sonra azaldığını, makro silikon uygulamalarında pamuk kumaşların patlama mukavemetindeki kaybın daha fazla olduğunu, hava geçirgenliği değerlerinde daha fazla azalma olduğunu göstermiştir (Orhan vd., 2020). Demiryürek & Kılıç, tarafından yapılan çalışmada pamuk ve viskon karışımı ring ipliklerin düzgünlük, tüylülük ve sürtünme katsayısı özellikleri incelenmiştir. 5 farklı büküm katsayısında ve 4 farklı iplik yoğunluğuna sahip olan %100 pamuk, %50/%50 pamuk/viskon ve %100 viskon ring iplikler elde etmişlerdir. Çalışma sonucunda pamuk oranının artmasıyla iplik düzgünlük ve tüylülüğünün arttığı, ancak sürtünme katsayısının azaldığı ayrıca, karışım oranı ve lineer yoğunluk faktörlerinin büküm faktörüne göre iplik özellikleri üzerinde daha etkili olduğu gözlenmiştir (Demiryürek & Kılıç, 2016).

Kayseri vd., tarafından yapılan çalışmada viskon, modal ve lyocell lifleri olmak üzere rejenere selüloz liflerinin performans özellikleri incelenmiştir. Standart viskon, modal ve yeni lyocell liflerinin aynı kimyasal yapıya sahip olmalarına rağmen farklı üretim yöntemleriyle üretilmesi ancak liflerin farklı yapısal özelliklerine sahip olduğu, bununda bazı örme kumaşlarda farklı renk verimliliği ve termo fizyolojik konfor özelliklerine neden olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda lyocell liflerinden üretilen kumaşların ısı iletkenliğinin daha fazla olduğu, viskon ve modal liflerine göre ilk dokunuşta daha serinlik hissi verdiği belirtilmiştir. Renk verimliliğinin en yüksek lyocell liflerinden üretilen kumaşlarda olduğu belirtilmiştir (Kayseri vd., 2010).

Kıvrak vd., tarafından yapılan bu çalışmada, yeni nesil rejenere liflerden; bambu, viskon, modal, lyocell, promodal, mikromodal lifleri kullanarak %100 oranında ve %50 pamuk karışımlarından iplikler elde etmiştir. Bu ipliklerin fiziksel özelliklerini istatistiksel olarak analiz etmiştir. Çalışma sonucunda viskon ve bambu dışındaki liflerin mukavemet değerlerinin pamuk lifinden daha yüksek değerlerde, lyocell lifinin mukavemet değerinin ise en yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca düzgünlük, ince ve kalın yer değerleri incelendiğinde, bambu ve pamuk iplikleri en yüksek değerleri gösterirken, mikromodal ipliklerinde en düşük olduğu gözlemlenmiştir (Kıvrak vd., 2018).

Uyanık & Duru Baykal (2017), yaptıkları çalışmada lif cinsinin ve karışım oranlarının kumaşlarda boyama sonrasındaki etkilerini incelemişlerdir. Kumaşların renk tonundaki değişimlerin lif cinsinden doğrudan etkilendiğini en belirgin renk tonu değişimlerinin de viskon içeren kumaşlarda görüldüğünü belirtmişlerdir. Kumaşlarda viskon oranının değişmesiyle renk tonunda değişim olduğu rejenere viskon lifinin diğer liflere göre daha yüksek boyarmadde afinitesine sahip olduğu ve daha fazla boya aldığını tespit etmişlerdir. Pamuk-viskon karışımı kumaşlarda viskon lifinden daha düşük boyarmadde afinitesine sahip olan pamuk lif oranının %95'ten %90'a düşerek viskon lif oranının

artmasıyla ΔE (toplam renk farkının) 1'den yüksek olduğunu gözlemlemiştir. Hidrofil liflerde lif oranı %5 değiştiğinde kumaşın renk tonunu belirgin şekilde değiştirdiği bildirilmiştir (Uyanık & Duru Baykal, 2017).

Güler çalışmasında, üç farklı selülozik esaslı lif grubunun yüzey özelliklerini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Selüloz esaslı lifler olarak viskon, modal ve pamuk liflerini kullanmıştır. Viskon liflerinde soda muamelesi ile kopma dayanımının arttığını ancak modal lifinde düşüşlerin olduğunu, pamuk liflerinin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelediğinde ise, genel bir düşüşe neden olduğunu gözlemlemiştir. Bunun nedeninin viskon liflerinin daha çok fibrilleşmesi ve fibrilleşmesinde lif dayanımının arttırmasına bağlı olduğunu bildirmiştir. Çalışma sonucunda uyguladığı enzim muamelesi ile pamuk liflerinin yüzey düzgünlüğünde artış, viskon ve modal liflerinde herhangi bir değişim olmadığını bildirmiştir. Sürtünme ile mekanik aşındırma işlemi sonrasında; pamuk liflerinin tipik fibrilsel görüntülerini yitirdikleri, viskon ve modal liflerinde ise yüzey aşınmalarının olduğunu ve yüzey düzgünlüğünü de arttığını tespit etmiştir. Sürtünme sonucu oluşan mekanik hasarın modal liflerinde, viskona göre daha zayıf bir kabuk kısmının olduğu gözlenmiştir (Güler 2008).

Degrade boyama yönteminin genellikle iplik boyama ya da iplik baskı yöntemiyle elde edilmektedir ve bu iki yöntem işletme içerisinde sürekli kontrol, makine ayarlarında revizyon gerekliliği, yüksek üretim maliyeti ve düşük üretim hızına sebep olmaktadır. İlaveten degrade boyama prosesi düz boya prosesi gibi standart proses olmayıp boyama sırasında insan tarafından kontrol edilen birçok parametre olması sebebiyle insan kaynaklı hatalara açık bir süreçtir (Karaboyacı 2015). Bu nedenle endüstriyel tesislerde degrade boyama prosesinin iyileştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Literatürde degrade boyama konusunda yapılan çalışmaların; iplik boyama, baskı ile efeklendirme ya da konfeksiyon parça boyama üzerinde yoğunlaştığı görülmüştür. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, farklı oranlarda pamuk ve viskon içeren ipliklerden üretilen örme kumaşa tek adımda boyama ile degrade efekti elde edilmiştir. Bu amaçla pamuk ve viskon liflerinin harman oranlarının ters orantılı olarak değiştirilmesiyle farklı karışımlarda iplik üretimleri gerçekleştirilmiş ardından %100 pamuk, %70/30 pamuk/viskon, %50/50 pamuk/viskon, %30/70 pamuk/viskon, %100 viskon sıralı olarak süprem örme kumaş elde edilmiştir. Üretilen süprem kumaşa kırmızı renkte tek boyama işlemi yapılarak degrade efektli örme kumaş elde edilmiştir. Degrade efektli örme kumaşa pamuk ve viskon lif oranlarının değişimine bağlı renk değişimi, haslık ve boncuklanma dayanımı özellikleri incelenmiştir. Aynı selüloz yapısına sahip liflerin amorf/kristalin yapılarının kumaşa etkisi değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOD

Selüloz esaslı lifler kullanılarak gerçekleştirilen bu çalışmada pamuk ve viskon lifleri kullanılmıştır. Farklı karışımlarda artan elyaf oranında %100 pamuk, %70/30 pamuk/viskon, %50/50 pamuk/viskon, %30/70 pamuk/viskon, %100 viskon Ne 30/1 ring iplik üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen ipliklerin fiziksel özellikleri, standartlara bağlı olarak tespit edilmiştir. İplik numuneleri, 20 ± 2 °C sıcaklıkta ve $65 \pm 4\%$ bağıl nemde 24 saat kondisyonlanarak işleme alınmıştır. İplik düzgünlüğü ve iplik hataları ISO 16549 standardına göre Uster® Tester 5 cihazı ile her bir iplik tipine ait 5 adet kopstan 400 m/dak test hızında gerçekleştirilmiştir. İnce ve kalın yerler ile neps miktarı sonuçları 1000 m için verilmiştir. Viskon ve pamuk elyafından elde edilen Ne 30/1 ipliklerin düzgünlük değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Numune İpliklerin Mukavemet ve Düzgünlük Değerleri

İplik Bilgileri	Kopma Uzaması %	Kopma Mukavemeti cN/tex	%U	%CV	(-)40 % İnce	(+)35 % Kalın	Neps +200%
%100 Pamuk	4,82	16,55	10,46	13,23	120,0	433,3	38,3
%70 Pamuk / %30 Viskon	4,95	15,63	9,49	11,94	33,3	213,3	18,3
%50 Pamuk / %50 Viskon	5,46	14,51	9,01	11,44	21,7	165,8	41,7
%30 Pamuk / %70 Viskon	7,02	15,73	9,43	11,96	52,5	150,8	93,3
%100 Viskon	14,05	20,51	8,41	10,59	9,2	52,5	31,7

Yapılan çalışmada iplik kopma mukavemeti ve uzama ölçüm değerleri incelendiğinde, %100 pamuk elyafından üretilen ipliklerin %100 viskon elyafından üretilen ipliklere göre kopma uzaması ve kopma mukavemeti değerlerinin daha düşük olduğu, pamuk elyaf oranının azalmasına bağlı olarak mukavemet değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Demiryürek ve ark., çalışmalarında bahsettiği gibi pamuk elyaf oranının artmasıyla iplik düzgünlük ve tüylülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

Üretilen ham iplikler kullanılarak, tek yataklı yuvarlak örme makinesinde sırasıyla 34 pus, 28 fein, iplikteki viskon oranı artacak şekilde sıralanarak ipliklerin örgü makinesine beslenmesiyle örgü kumaş üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kumaşa ait kalınlık, gramaj, ilmek sıklığı ve ilmek iplik uzunluğu değerleri TS EN ISO 2286-3, TS 251, TS EN 12127, TS EN 14971, TS EN 14970 standartlarına uygun olarak belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

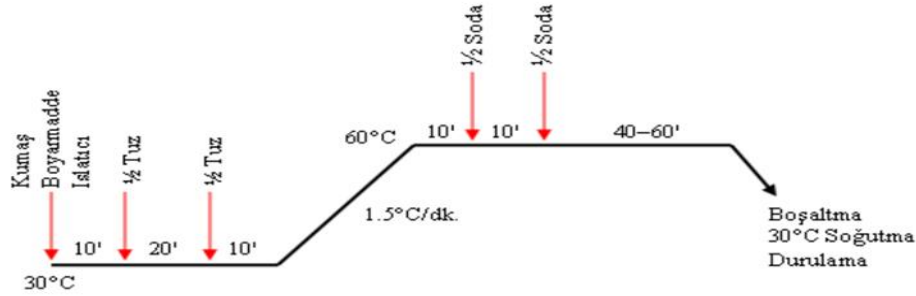
Tablo 2. Kumaş Yapısal Parametreleri

İlmeğin İplik Uzunluğu (mm)	2,8
İlmeğin Sıra Sayısı (adet/cm)	12
İlmeğin Çubuk sayısı (adet/cm)	20
Kumaş Kalınlığı (mm)	0,5
Kumaş Gramajı (g/m ²)	137

Numune kumaş reaktif boyarmaddeler ile çektirme boyama yöntemine göre 1/7 flotte oranında boyanmıştır. Uygulanan boyama reçetesi Tablo 3’te ve boyama grafiği Şekil 1’de verilmiştir. Boyamanın ardından 30°C de yıkama işlemi yapılmıştır.

Tablo 3. Boyama Reçetesi

Tuz (Katı)	80 g
Sarı (Sunfix Yellow SPD Conc.)	% 1,6
Kırmızı (Sunfix Red S2B)	% 5
Mavi (Setazol Blue PLF)	% 0,02
Soda	2 g
Kostik	2,2 g



Şekil 1. Numunelere Uygulanan Ağartma, Boyama ve Yıkama İşlem Grafiği

Viskon elyafının pamuk elyafına göre amorf bölge oranının fazla olmasının boya alımını ve boya derinliğini de etkileyeceği göz önünde bulundurularak renk farklılıklarının tespiti için X-rite 7800 Spektrofotometre cihazı ile AATCC 173 standardına göre kumaşların CIE L*a*b* renk değerleri; 90° gözlemci açısıyla 4 ölçüm olmak üzere okutulması gerçekleştirilmiştir. L* açıklığı temsil eder, 0 mükemmel bir siyahtır ve %0 yansıtma veya geçirgenlik ile. %50’lik bir derecelendirme orta griyi, 100 derecelendirmesi ise mükemmel bir beyazı gösterir. Bu, %100 yansıma ve mükemmel netlik anlamına gelir. a* rengin kırmızı-griliğini temsil eder. a*’nın pozitif değerleri kırmızı, negatif değerleri ise yeşildir. 0 seviyesi nötrdür. b* rengin sarı-maviliğini ifade eder. b*’nin pozitif değerleri sarı, negatif değerleri ise mavidir. 0 tarafsızlığı gösterir. D65/10 altında, spekular bileşen dahil olacak şekilde ölçülen reflektans değerlerine göre belirlenmiştir.

Numunelerin boncuklanma dayanımı TS EN ISO 12945-2 standardına göre SDL Atlas marka Martindale M235 test cihazında test edilmiştir. Aşındırıcı yüzey olarak her bir numunenin kendisiyle sürtünmesi gerçekleştirilmiştir.

Boncuklanma dayanımı cihazın 2000 devri sonucunda değerlendirilmiştir. Boncuklanma dayanımı ışık kabinde D65 gün ışığı altında ASTM fotografik görünüm skalası ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Numunelerin su, ter, yıkama ve sürtme haslıkları ISO105 E01, ISO105 E04, ISO105 C06, ISO105 X12 standardına göre yapılmış ve gri skala kullanılarak değerlendirilmiştir.

SONUÇLAR

Renk Ölçümü

Referans olarak kullanılan %100 viskon kırmızı renk boyalı örme kumaşın spektrofotometre ile renk ölçümleri yapılarak artan pamuk oranındaki numune kumaşların karşılaştırmasında toplam renk farkı (ΔE) kontrol edilerek CIE L*a*b* renk değerleri incelenmiş ve sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. CIE L*a*b* Renk Değerleri

Kumaş Bilgileri	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔH^*
%100 Pamuk	35,86	54,83	20,13	5,57 Daha Açık	1,15 Daha kırmızı	-5,98 Daha Mavi	-5,94 Daha Kırmızı
%70 Pamuk / %30 Viskon	32,79	53,64	21,60	2,50 Daha Açık	-0,05 Daha Yeşil	-4,50 Daha Mavi	-4,09 Daha Kırmızı
%50 Pamuk / %50 Viskon	32,94	52,80	21,18	2,65 Daha Açık	-0,89 Daha Yeşil	-4,91 Daha Mavi	-4,13 Daha Kırmızı
%30 Pamuk / %70 Viskon	31,84	52,97	22,63	1,55 Daha Açık	-0,72 Daha Yeşil	-3,46 Daha Mavi	-2,85 Daha Kırmızı
%100 Viskon	30,29	53,69	26,10				REFERANS RENK

Referans alınan %100 viskon alanının L* değerinin 30.29 olarak en koyu değere sahip olduğu, viskon elyaf oranının %30 azalmasıyla 1.55 kadar koyuluğun azaldığı, %70 azalmasıyla da koyuluğun 2.50 olarak azaldığı, viskon kullanılmayan %100 pamuk olan alanın %100 viskona göre 5.57 daha açık olduğu tespit edilmiştir. Referans alınan %100 viskon elyafa göre viskon elyaf oranının azalması ile ΔH^* renk farkı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Uyanık ve Duru Baykal'ın çalışmalarında bahsettiği üzere pamuk-viskon karışımli kumaşlarda, pamuk lif oranının %95'ten %90'a düşerek viskon lif oranının artmasıyla toplam renk farkının (ΔE) 1'den yüksek olduğunu gözlemlenmişlerdir. Uyanık ve Duru Baykal'ın yaptıkları çalışmada bahsettiği üzere kumaşların renk tonundaki değişmelerin lif cinsinden doğrudan etkilendiğini en belirgin renk tonu değişimlerinin de viskon içeren kumaşlarda olduğu görülmüştür. Yapılan bu çalışma ile farklı oranlarda kullanılan liflerin boyarmadde afinite farklılığından faydalanarak tek boyama sonucu renk geçişi olarak adlandırılan degrade efekti oluşturulmuştur (Şekil 2).



Şekil 2. Boyalı Degrade Efektli Numune Kumaş Görseli

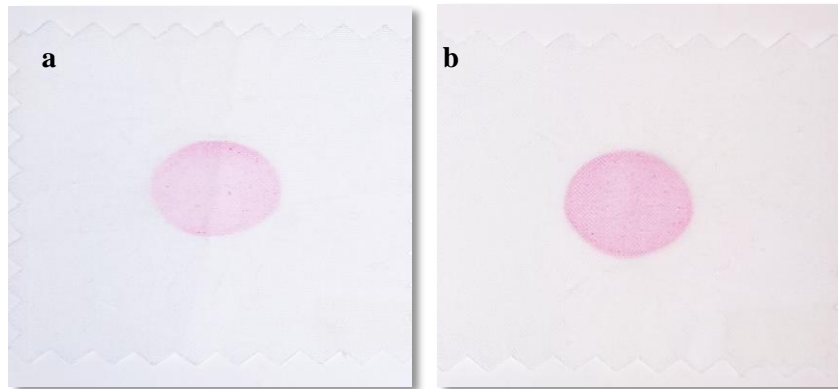
Haslık Testleri

Yapılan çalışma kapsamında kırmızı renkli kumaşın haslık test değerleri Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5. Haslık Test Sonuçları

		Yün	Akrilik	Polyester	Naylon	Pamuk	Asetat
%100 Pamuk	Asit	4/5	4/5	4/5	4/5	4	4/5
	Baz	4/5	4/5	4/5	4/5	4	4/5
	Su	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5
	Kuru				4/5		
	Yaş				2/3		
	Yıkama	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
%70 Pamuk / %30 Viskon	Asit	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Baz	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Su	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5
	Kuru				4/5		
	Yaş				3		
	Yıkama	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
%50 Pamuk / %50 Viskon	Asit	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5
	Baz	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Su	4/5	4/5	4/5	4	4	4/5
	Kuru				4/5		
	Yaş				3		
	Yıkama	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
%30 Pamuk / %70 Viskon	Asit	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Baz	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Su	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Kuru				4/5		
	Yaş				3		
	Yıkama	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
%100 Viskon	Asit	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Baz	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Su	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5
	Kuru				4/5		
	Yaş				2		
	Yıkama	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5	4/5

Haslık değerinde %100 viskon ile üretilen alanın yaş sürtme haslığının yarım derece düşük olduğu viskon oranının azalmasıyla yaş sürtme haslığının arttığı görülmüştür. %100 pamuklu ve %100 viskon kumaşların yaş sürtme haslık değerleri Şekil 3'te verilmiştir.

**Şekil 3.** Yaş Sürtme Haslık Testi Sonrası

a. %100 Pamuklu Kumaş b. %100 Viskon Kumaş

Boncuklanma Dayanımı

Boncuklanma dayanımı %100 Pamuk, %70 Pamuk / %30 Viskon, %50 Pamuk / %50 Viskon, %30 Pamuk / %70 Viskon olarak değerlendirilerek Tablo 6'da yer verilmiştir.

Tablo 6. Boncuklanma Dayanımı

%100 Pamuk	3
%70 Pamuk / %30 Viskon	3/4
%50 Pamuk / %50 Viskon	3/4
%30 Pamuk / %70 Viskon	3/4
%100 Viskon	2/3

Boncuklanma dayanımı değerleri incelendiğinde %100 pamuk karışımla örülmüş kumaşın boncuklanma dayanımının yüksek olduğu, viskon elyaf oranının artmasına bağlı olarak boncuklanma dayanımının azaldığı, %100 viskon elyafından örülmüş alanda daha fazla boncuklanma olduğu görülmüştür.

DEĞERLENDİRMELER

Günümüz lif tüketim oranları dikkate alındığında artan talep ve moda bağlı olarak, rejenere selüloz liflerinin kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. Selüloz esaslı liflerin üretim tekniklerinden kaynaklanan farklılıklar bu liflerin makromoleküler yapılarını ve fiziksel özelliklerini değiştirmektedir. Bilindiği üzere, viskon liflerinin pamuktan farklılıkları, farklı kristal kafes yapılarıyla açıklanabilmektedir. Konvansiyonel viskon lifleri, pamuk liflerine göre daha yüksek su ve boya alma yeteneğine sahip olduğundan dolayı aynı şartlarda boyanmasına rağmen daha fazla boya alımına neden olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada ring eğirme sisteminde Ne 30/1 iplik numarasında % 100 pamuk, % 70/30 pamuk/viskon, %50/50 pamuk/viskon, %30/70 pamuk/viskon, % 100 viskon oranlarında iplikler üretilerek, örgü işletmesinde pamuk ve viskon lifleriyle artan oranlarda sırasıyla örme işlemi gerçekleştirilmiştir. Örgü işlemi tamamlanan numune kumaşlar aynı reçete ile tek banyoda boyanarak, boyama sonunda numune kumaş yüzeyinde (koyudan açığa doğru yönelen renk tonları ile) degrade efekti elde edilmiştir. Kırmızı renk ile boyanan kumaşın % 100 pamuk, % 70/30 pamuk/viskon, %50/50 pamuk/viskon, %30/70 pamuk/viskon, %100 viskon içeren bölgelerinin, spektrofotometrede renk okutmaları yapılarak renk alım değerleri karşılaştırılmıştır. Buna göre; %100 viskon alanın L* değerinin 30.29 olarak en koyu değere sahip olduğu, viskon elyaf oranının %30 azalmasıyla 1.55 kadar koyuluğun azaldığı, %70 azalmasıyla da koyuluğun 2.50 olarak azaldığı, viskon kullanılmayan %100 pamuk olan alanın %100 viskona göre 5.57 daha açık olduğu tespit edilmiştir. Referans alınan %100 viskon elyafa göre viskon elyaf oranının azalması ile ΔH^* renk farkı değerinin arttığı gözlemlenmiştir. İlave olarak viskon pamuk oranının değişmesine bağlı olarak viskon oranının azalmasıyla boyalı kumaş görünümünde koyu tondan açık tona doğru bir görünüm meydana gelmiştir. Kumaşlara haslık ve renk ölçümü testleri yapılmıştır. Haslık değerinde % 100 viskon ile üretilen alanın yaş sürtme haslığının yarım derece düşük olduğu viskon oranının azalmasıyla yaş sürtme haslığının arttığı görülmüştür. Boncuklanma dayanımı değerinin %100 viskondan üretilen alanda 2 derece daha düşük olduğu pamuk oranının artmasıyla boncuklanma dayanımı değerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. %100 pamuk elyafının %100 viskon elyafına göre; sürtme haslık değerinin 1 derece iyi olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile farklı oranlarda kullanılan liflerin boyarmadde afinitesinden faydalanarak tek boyama sonucu renk geçişi olarak adlandırılan degrade efekti oluşturulmuştur.

Yapılan çalışma kapsamında selüloz esaslı liflerin kullanımı ile üretilen kumaşta renk alımlarının kristalin/amorf bölge oranlarına bağlı olarak arttığı performans ve haslık değerlerinin de yine kullanılan hammadde oranına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Pamuk ve viskon lifleri kullanılarak yapılan bu çalışma sonrasında selüloz esaslı diğer liflerle gerçekleştirilecek lif karışımları ile farklı desen ve renklerde üretimlerin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Demiryürek, O., Kılıç, A., (2016). Pamuk/Viskon Karışımli Ring İpliklerin Düzgünsüzlük, Tüylülük ve Sürtünme Özelliklerinin İncelenmesi, Tekstil ve Mühendis, 23: 102, 93-99.

Güler, (2008), N., Rejenere Selüloz Liflerinin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa

Gökçen Ö., Bahadır Ünal Z., (2021).Viskon Kumaş Üretiminde Konfeksiyon İşletmesinde Yaşanan Sorunlar ve Çözüm Önerileri, TJFDM, 2021, 3 (2): 57-68

Karaboyacı, M.,(2015) Degrade Boyama, Türkiye Tekstil Terbiye Sanayicileri Derneği Dergisi Sayı: 7 / Mart 2015

Kayseri, G.Ö., Bozdoğan, F., Hes, L., (2010) Performance Properties Of Regenerated Cellulose Fibers, Tekstil Ve Konfeksiyon 3/2010

Kıvrak, N.M., Özdil, N., Mengüç, G.S.,(2018) Characteristics Of The Yarns Spun From Regenerated Cellulosic Fibers, Tekstil Ve Konfeksiyon 28(2),

Orhan, M., Tiritöglü, M., Özbarutçu, B., (2020). Silikon Yumuşatıcıların Pamuk ve Viskon Örme Kumaşlar Üzerinde Etkileri Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 25, Sayı 2, DOI: 10.17482/uumfd.660283

Uyanık, S., Duru, B.P.,(2017), Lif Cinsi, Karışım Oranı ve Kumaş Sıklığının Vortex İpliklerden Örülmüş Boyalı Kumaşların Rengine Etkileri, <https://www.researchgate.net/publication/324017951>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.07.2023
Kabul Tarihi : 30.09.2023

Received Date : 18.07.2023
Accepted Date : 30.09.2023

KİLİN MUKAVEMETİ VE DONMA-ÇÖZÜLME SONRASI MUKAVEMETİ ÜZERİNDE BİYOPOLİMER VE LİF KATKISININ ORTAK ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION THE COMBINED EFFECT OF BIOPOLYMER AND FIBER ADDITIVES ON STRENGTH AND POST FREEZING-THAWING STRENGTH OF CLAY

Büşra GÜVEN¹ (ORCID: 0000-0001-7255-3307)

Şifa GÜNEK¹ (ORCID: 0000-0002-0446-2056)

Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK^{1*} (ORCID: 0000-0002-6323-8652)

¹ Atatürk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK, znkurt@atauni.edu.tr

ÖZET

Kil zeminler, suyla karşılaştıklarında hacimsel stabiliteyi kaybettikleri için problemlerli zeminler olarak bilinmektedir. Ayrıca donma-çözülme olayı bu zeminlerin mühendislik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen önemli bir parametredir. Kil zeminlerin bu gibi durumlara karşı özelliklerini iyileştirmek amacıyla birçok iyileştirme yöntemi bulunmaktadır. Katkı malzemeleri ile zemin iyileştirme yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Katkılar arasında geleneksel olarak kullanılan çimento, kireç gibi kimyasal malzemeler yer alırken uçucu kül gibi atık malzemeler de kullanılmaktadır. Son yıllarda bu malzemelerin çevreye verdikleri zarar göz önüne alınarak araştırmacılar tarafından karbon salınımına neden olmayan malzeme arayışına gidilmiştir. Bu bağlamda çevre dostu, yeşil polimerler olarak tabir edilen biyopolimerler ile zemin iyileştirmesi yaygın olarak çalışılmaya başlanmıştır. Bunlara ilaveten lifler de zemin iyileştirmesinde alternatif olarak kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır. Literatürde biyopolimer ve liflerin bir arada kullanılması ile zeminlerin iyileştirilmesi ise yeni bir konudur. Bu çalışma kapsamında bir biyopolimer olan keçiyoynuzu gam ile sentetik bir lif olan polyester iplik farklı yüzdelerde kullanılarak kil bir zeminin mukavemet ve donma çözülme sonrası mukavemet davranışı araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, biyopolimer ve lifin bir arada kullanılmasının kil zeminin serbest basınç ve donma çözülme sonrası mukavemetini yalnız lif ve yalnız biyopolimer içeren kile göre daha fazla iyileştirdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kil, lif, biyopolimer, donma-çözülme, serbest basınç mukavemeti

ABSTRACT

Clay soils are known as problematic soils because they lose volumetric stability when they encounter water. Additionally, freeze-thaw phenomenon is an important parameter adversely affects the properties of soils. There are many improvement methods to improve the properties of clay soils to prevent such conditions. Soil improvement with additives is one of the commonly used methods. Among the additives, traditionally chemical materials (i.e. cement, lime) are used, while waste materials (i.e. fly ash) are also used. In recent years, considering environmental damage of these materials, researchers have been searched for materials that don't cause carbon emissions. In this context, improvement with biopolymers, that called environmentally friendly, green polymers started to be studied. In addition to these, fibers are also used in soil improvement. In literature, the improvement of soils by biopolymers and fibers combined is a new topic. In this study, locust bean gum, a biopolymer, and polyester fiber, a synthetic fiber, were used in different percentages to investigate the strength and post-freeze-thaw strength of clay soil. As a result of the study, it was observed that combination of biopolymer and fiber improved the unconfined compressive strength and post freeze-thaw strength of clay soil more than fiber and biopolymer.

ToCite: GÜVEN, B., GÜNEK, Ş., & KURT ALBAYRAK, Z. N., (2023). KİLİN MUKAVEMETİ VE DONMA-ÇÖZÜLME SONRASI MUKAVEMETİ ÜZERİNDE BİYOPOLİMER VE LİF KATKISININ ORTAK ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 951-961.

Keywords: Clay, fiber, biopolymer, freezing-thawing, unconfined compression strength

GİRİŞ

Zemin mekaniğinde zeminlerin taşıma gücü ve oturma davranışları önem taşımaktadır. Özellikle kil zeminler, suyla karşılaştıklarında hacimsel stabiliteyi kaybederek oturma-şişme davranışları sergilemekte ve suyla etkileşim sonucunda taşıma güçlerinde azalma meydana gelmektedir. İlave olarak soğuk iklim bölgelerinde zeminlerin donma-çözülme maruz kalması, mühendislik özelliklerini etkilemektedir (Rezai Fard vd., 2020; Zaimoglu, 2010). Kil zeminlerin bu davranışlarının iyileştirilmesi için birçok iyileştirme yöntemi uygulanmaktadır. Bu yöntemler arasında katkılarla zemin iyileştirme yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olup katkı olarak çimento, kireç gibi geleneksel malzemeler kullanılmaktadır (Dahale vd., 2017). Atık malzemeler de katkı malzemesi olarak kullanılmakta ve böylece kil zemin iyileştirilirken, atık malzemelerin neden olduğu depolama probleminin de önüne geçilmektedir. Bu tür atık malzemeler arasında uçucu kül, silis dumanı ve kırmızı çamur sayılabilir (Ekmen vd., 2020; Çelik, 2017; Kalkan ve Akbulut, 2004). Son yıllarda yapılan araştırmalar, bu tür kimyasal malzemelerin çevreye CO₂ gazı salınladıklarını göstermiştir (Chang vd., 2016). Bunun sonucunda, araştırmacılar tarafından karbon salınımına neden olmayan malzeme arayışına gidilmiştir. Bu bağlamda çevre dostu, yeşil polimerler olarak tabir edilen biyopolimerler ile zemin iyileştirmesi son yıllarda çalışılmaya başlanmıştır (Fatehi vd., 2021). Chang vd. (2015a), biyopolimerle iyileştirilen zeminlerin mukavemetlerinin, daha fazla miktarda çimento ile iyileştirilen zeminlerin mukavemetinden daha yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

Biyopolimerler, selüloz gibi polisakkaritler, jelatin, kazein ve ipek gibi proteinler ve deniz prokaryotları gibi doğal kaynaklardan üretilen polimerlerdir (Chang vd., 2020). Taşıma gücü ve sıvılaşma direncinin artırılması, zemin erozyonu ve yer altı suyu kontrolü, zemin suyu ve yer altı suyunun artırılması, geçirimsiz şilte oluşturulması, tarama malzemelerinin stabilizasyonu gibi birçok uygulamada kullanılan biyopolimerlerin birçok çeşidi bulunmaktadır. Ayhan (2011), biyopolimerlerin kaolin ve bentonit killerinin likit limit değerlerini arttırdığını ve şişme potansiyeline sahip killi zeminlerin şişme potansiyellerinin düşürülmesinde biyopolimerlerin kullanılabilirliğini belirtmiştir. Literatürde biyopolimerlerin zeminlerin serbest basınç mukavemetini arttırdığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Smitha ve Sachan, 2016; Chang vd., 2015b; Khatami ve O’Kelly, 2013). İnce daneli zeminlerle daha iyi etkileşime giren biyopolimerler, zeminlerin hidrolik iletkenliğini de azaltmaktadır (Chang vd., 2016; Wiszniewski ve Cabalar, 2014). Biyopolimerler, zemin iyileştirmesinde kullanılan birçok malzemeye göre daha maliyetli olmalarına rağmen çok küçük yüzdelerde kullanıldıklarında dahi zemin özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilmektedirler. Bu nedenle zemin iyileştirmesinde kullanıldıklarında büyük miktarlara ihtiyaç duyulmayacak olması nedeni ile daha az bir maliyet ile iyileştirme yapılabilir. Chang vd. (2016), biyopolimerlerin gıda maddelerinde kıvam artırıcı olarak kullanıldıkları için yüksek saflıkta üretildiğinden ve bunun maliyeti arttırdığından bahsetmiş ve geoteknik uygulamalarda kullanılan biyopolimerlerin yüksek saflıkta olması gerekmediğinden, bu uygulamalar için üretildiklerinde daha düşük maliyetlere sahip olmasının beklendiğini ifade etmişlerdir. Ticari olarak satılmakta olan biyopolimerlere çeşitli yerli ve yabancı firmalardan kolaylıkla ulaşabilmek mümkün olup, biyopolimerlerin zemin iyileştirmesinde kullanımı yaygınlaştıkça, bu amaca yönelik üretilecek biyopolimerlerin daha makul maliyetler ile temin edilebileceği düşünülmektedir.

Zemin iyileştirmesinde kullanılan bir diğer malzeme olan lifler ile güçlendirilmiş zeminler, nispeten yüksek çekme dayanımına sahip liflerin, zemin içerisine katıldığı kompozit bir malzeme gibi davranır ve zeminin kayma mukavemeti ve taşıma gücü artar (Çelik vd., 2017; Jamshidi vd., 2010). Zaimoglu (2010), çalışmada farklı oranlarda polipropilen lifler kullanarak ince daneli bir zeminin mukavemet davranışını incelemiş ve numunelerin donma çözülme sonrası serbest basınç dayanımlarının artan lif içeriği ile arttığını ortaya koymuştur. Zemin iyileştirmesinde kullanılan lifler doğal (bambu lifi, hindistan cevizi lifi, saman, vb.) veya sentetik (polipropilen, polyester, polietilen, cam lifler, vb.) olabilir (Hejazi vd., 2012).

Biyopolimerler ile yapılmış zemin iyileştirme çalışmaları incelendiğinde, keçiyoynuzu gam ile zemin iyileştirme konusunda yapılmış az sayıda çalışmada, keçiyoynuzu gamın zeminin geoteknik özelliklerini olumlu yönde geliştirdiği belirlenmiştir (Cheng ve Geng 2021, Kurt Albayrak ve Altun 2021, Kurt Albayrak ve Gencer 2021). Zemin iyileştirmesinde liflerin ve biyopolimerlerin bir arada kullanılması güncel bir konu olup, bu konuda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Chen vd. (2022), siltli kil bir zemine farklı oranlarda polipropilen lif ve zantan gam ilave ederek elde ettiği katkılı killerin mukavemet özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmanın amacı, kil bir zeminin iyileştirmesinde keçiyoynuzu gam biyopolimeri ile sentetik bir lif olan polyester ipliğinin bir arada kullanılmasının kilin mukavemet ve donma-çözülme sonrası mukavemet özelliklerini nasıl değiştirdiğinin araştırılması ile literatüre

katkı sağlanmasıdır. Bu kapsamda, kil bir zemine farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam (%0.5, %1 ve %1.5) ve 5mm uzunluğunda kesilmiş polyester iplik (%0.15, %0.30 ve %0.60) ilave edilerek katkılı killer elde edilmiştir. Elde edilen katkılı killer 1 gün ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Katkılı killerin serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemet değerleri doğal kilin, yalnız biyopolimer katkılı kil numunelerin ve yalnız lif katkılı numunelerin değerleri ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kil

Çalışma kapsamında kullanılan kil, Oltu (Erzurum) Havzasından temin edilmiş, kırmızı renkli, yüksek plastisiteli (CH) bir kildir (Şekil 1a). Kil ile ilgili geoteknik özellikler Tablo 1’de görülmektedir. Doğal kil laboratuvara getirildikten sonra 105°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurutulmuştur. Kuruyan numuneler öğütülmüş ve deneylerde kullanılmıştır. Yapılan hidrometre analizinde, kil yüzdesi (<0.002mm) %58 olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Kilin Özellikleri

Özellik	Kil
Geçen Yüzde (<0.002mm) (%)	58
Özgül Ağırlık	2,72
Optimum su içeriği (%)	21
Maksimum kuru birim hacim ağırlığı, (kN/m ³)	16,3
Likit Limit (%)	59
Plastik Limit (%)	26
Plastisite İndisi (%)	33
Zemin Sınıfı (USCS*)	CH

*Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi

Biyopolimer

Çalışmada keçiyoynuzu gam biyopolimeri (KBG) kullanılmıştır (Şekil 1b). Keçiyoynuzu gam, Smart Kimya’dan temin edilmiştir. Keçiyoynuzu gam, hidrokolloidlerin bir çeşidi olan Galaktomannan olup viskozitesi 2000-3500, pH’ı 5-7 arasındadır. Baklagiller grubu içerisinde yer alan karob ağacından elde edilen keçiyoynuzu gamın, jelleştirici, dengeleyici ve kıvam artırıcı özellikleri bulunmaktadır (Dey vd., 2012).

Lif

Çalışmada kullanılan sentetik lif, 2H Tekstil’den temin edilen 0.15mm kalınlıkta polyester ipliktir. Polyester iplik 5mm uzunluklarda kesilerek deneylerde kullanılmıştır (Şekil 1c).



Şekil 1. a) Kil Numunesi b) Keçiyoynuzu Gam c) Polyester İplik

Biyopolimer Katkılı Kil Numunelerin Elde Edilmesi

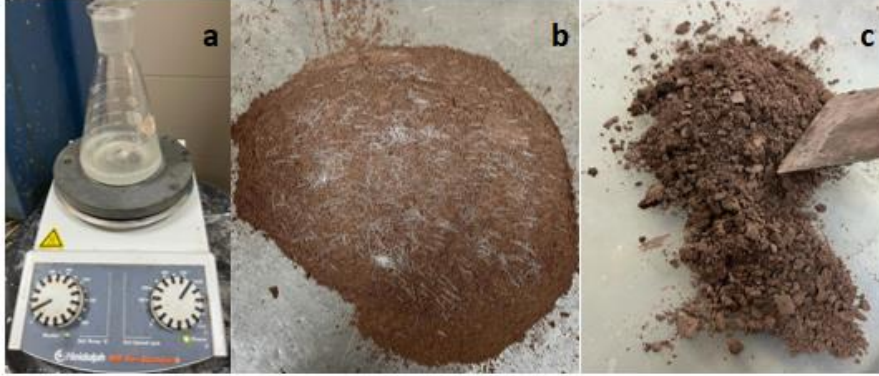
Biyopolimer katkılı kil numunelerin elde edilmesi için, öncelikle kilin optimum su içeriği kadar su tartılmıştır. Daha sonra bu su miktarının ağırlıkça yüzdesi (%0.5, %1, %1.5) kadar tartılan biyopolimer, belirlenen su içerisine ilave edilmiş ve 1000rpm hızda manyetik karıştırıcı kullanılarak çözülmüştür (Kurt Albayrak ve Altun 2021, Kurt Albayrak ve Gencer 2021). Çözülen biyopolimer, kil içerisine katılarak homojen hale gelinceye kadar karıştırılmış ve böylece biyopolimer katkılı kil numuneler elde edilmiştir.

Lif Katkılı Kil Numunelerin Elde Edilmesi

Lif katkılı kil numunelerin elde edilmesi için kilin ağırlıkça yüzdesi cinsinden tartılan lif, kil içerisine ilave edilmiş ve homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Daha sonra optimum su muhtevasında su eklenerek karıştırma işlemine devam edilmiş ve lif katkılı kil numuneler elde edilmiştir.

Biyopolimer-Lif Katkılı Kil Numunelerin Elde Edilmesi

Biyopolimer-lif katkılı numuneler elde edilirken öncelikle kil ve kilin ağırlıkça yüzdesi (%0.15, %0.30, %0.60) cinsinden belirlenmiş olan lif tartılarak kuru halde karıştırılmıştır. Ardından kilin optimum su muhtevası kadar su ve su miktarının ağırlıkça yüzdesi (%0.5, %1, %1.5) kadar biyopolimer tartılmış ve biyopolimer 1000rpm hızda manyetik karıştırıcı kullanılarak çözülmüştür (Kurt Albayrak ve Gencer 2021, Kurt Albayrak ve Altun 2021). Karıştırılmış olan kil-lif karışımı içerisine biyopolimer-su karışımı ilave edilerek homojen bir şekilde karıştırılmış ve biyopolimer-lif katkılı kil numuneler elde edilmiştir (Şekil 2). Katkı yüzdeleri Tablo 2’de görülmektedir.



Şekil 2. a) KBG Suda Çözünürken b) Kil-Lif Karıştırılırken c) Kil-Lif-Biyopolimer Karışımı

Tablo 2. Katkı Yüzdeleri

Numune	Lif (%)	Biyopolimer (%)
B0-L0	-	-
B0.5-L0	-	0,5
B1-L0	-	1
B1.5-L0	-	1,5
B0-L0.15	0,15	-
B0-L0.3	0,30	-
B0-L0.6	0,60	-
B0.5-L0.15	0,15	0,5
B1-L0.15	0,15	1
B1.5-L0.15	0,15	1,5
B0.5-L0.3	0,30	0,5
B1-L0.3	0,30	1
B1.5-L0.3	0,30	1,5
B0.5-L0.6	0,60	0,5
B1-L0.6	0,60	1
B1.5-L0.6	0,60	1,5

B: Biyopolimer, L: Lif

Deneyler

Numunelerin kompaksiyon parametreleri, Harvard minyatür kompaksiyon deneyi ile belirlenmiştir. Numunelere su ilave edilerek yoğrulmuş, 71 mm yüksekliğinde ve 32 mm çapında metal silindir kompaksiyon kalıbı içerisine her tabakaya 10’ar vuruş yapılmak suretiyle 5 tabaka halinde sıkıştırma yapılmıştır. Bu işlem numunelere su ilave edilerek farklı su içeriklerinde tekrarlanmış ve kompaksiyon parametreleri belirlenmiştir. Numunelerin serbest basınç mukavemetleri, ASTM D 2166 esas alınarak yapılan serbest basınç deneyi ile elde edilmiştir. Serbest basınç deneyinde yükleme hızı 0.8 mm/dak. olarak seçilmiştir. Numuneler, otomatik donma-çözülme kabini kullanılarak 10 çevrim donma-çözülme tabi tutulmuş ve donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Bir çevrim, donma aşaması 6 saat -20°C ve çözülme aşaması 6 saat +25°C olmak üzere 12 saatte gerçekleştirilmiştir (Akbulut ve Zaimoğlu, 2019; Ghazavi ve Roustaie, 2010). Numuneler 22 ± 2°C sıcaklığa, %18.5 nem oranına sahip laboratuvar ortamında 1 ve 28 gün bekletilerek küre tabi tutulmuştur. 1 gün ve 28 günlük kür süreleri sonunda numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Ayrıca 1 ve 28 gün bekletilen numuneler donma çözülme

çevrimine tabi tutulduktan sonra numunelerin serbest basınç mukavemetleri bulunmuştur. Her bir katkı oranı için 3'er adet numune hazırlanarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarının ortalamaları alınmıştır.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kompaksiyon Deney Sonuçları

Doğal kilin ve keçiyoynuzu gam katkılı kil numunelerin kompaksiyon parametreleri Tablo 3'de görülmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, keçiyoynuzu gam yüzdesi arttıkça, optimum su içeriğinin arttığı görülmektedir. Maksimum kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise önemli bir değişimin meydana gelmediği söylenebilir. Biyopolimer içeriğindeki artış, kil danelerinin difüzyon çift tabakasının viskozitesini artırarak kil danelerinin topak yapıya kavuşmasına neden olur. Bu da optimum su içeriğini artırır (Singh ve Das, 2020).

Tablo 3. Kompaksiyon Parametreleri

Numune	Optimum su içeriği (%)	Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m ³)
B0-L0	21	16,3
B0.5-L0	22,5	16,4
B1-L0	23	15,5
B1.5-L0	24	15,6

Serbest Basınç Deney Sonuçları

1 günlük ve 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olan serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, biyopolimer ve lif yüzdesi arttıkça numunelerin serbest basınç mukavemetinin arttığı görülmektedir (Şekil 3, Şekil 4). Doğal kile göre katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen artış yüzdeleri Tablo 4'de verilmiştir.

1 günlük numunelerde keçiyoynuzu gam ve polyester ipliğın ortak etkisi incelendiğinde B1.5-L0.60 numunesinin serbest basınç mukavemetinin doğal kilin serbest basınç mukavemetinden %280 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Doğal kilin serbest basınç mukavemetinde, yalnız %1.5 biyopolimer katkısı (B1.5-L0) %132 oranında, yalnız %0.6 lif katkısı (B0-L0.60) %188 oranında artışa neden olmuştur. 1 gün küre tabi tutulan %1.5 biyopolimer-%0.6 lif katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinin (1482kPa), yalnız biyopolimer (903kPa) ve yalnız lif (1123kPa) katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla, %64 ve %32 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur.

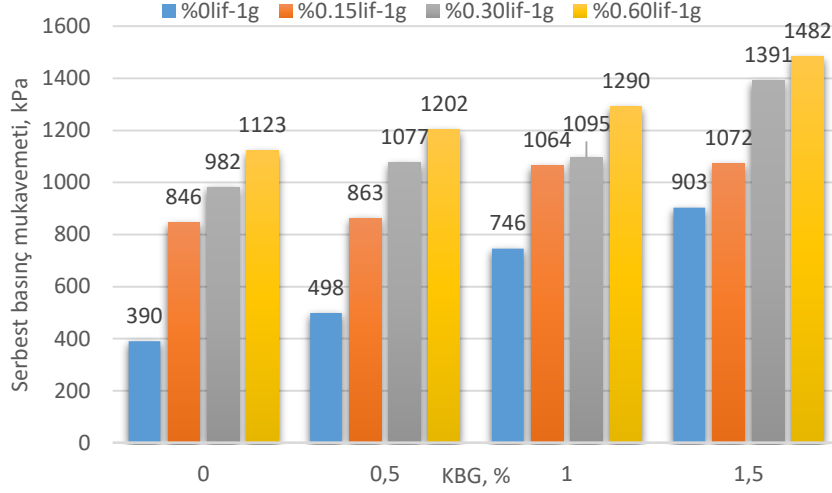
28 günlük numunelerde keçiyoynuzu gam ve polyester ipliğın ortak etkisi incelendiğinde B1.5-L0.60 numunesinin serbest basınç mukavemetinin doğal kilin serbest basınç mukavemetinden %1101 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Doğal kilin serbest basınç mukavemetinde, yalnız %1.5 biyopolimer katkısı (B1.5-L0) %916 oranında, yalnız %0.6 lif katkısı (B0-L0.60) %925 oranında artışa neden olmuştur. 28 gün küre tabi tutulan %1.5 biyopolimer-%0.6 lif katkılı numunenin serbest basınç mukavemetinin (4682kPa) yalnız biyopolimer (3964kPa) ve yalnız lif (3999kPa) katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla, %18 ve %17 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur. Serbest basınç mukavemetinde meydana gelen artışların 28 günlük numunelerde daha fazla olduğu görülmüştür (Tablo 4).

Biyopolimerler elektrik yüklü geniş özgül yüzeylere sahip oldukları için ince taneli zeminlerle etkileşime girebilirler, bunun sonucunda da yüksek mukavemetli biyopolimer-zemin matrisleri meydana gelir (Chang vd., 2016). Biyopolimerler, zemin içerisinde hidrojel oluşturarak, daneler arası boşlukları doldurur ve zemin danelerini birbirine bağlar (Latifi vd., 2016, Jang 2020). Ayeldeen vd., (2016), zemin biyopolimer karışımlarının kayma mukavemetindeki iyileşmenin, biyopolimerlerin hidroksiller, esterler veya aminler gibi farklı kimyasal fonksiyonel gruplara sahip olmasından kaynaklandığı belirtmişlerdir. Bu nedenlerle, biyopolimer yüzdesi arttıkça serbest basınç mukavemetinde artış meydana geldiği düşünülmektedir. Lif yüzdesinin artmasıyla serbest basınç mukavemetinde meydana gelen artışın ise lifin çekme dayanımının kil daneleri arasındaki bağı güçlendirmesinden kaynaklandığı söylenebilir (Ma vd., 2018).

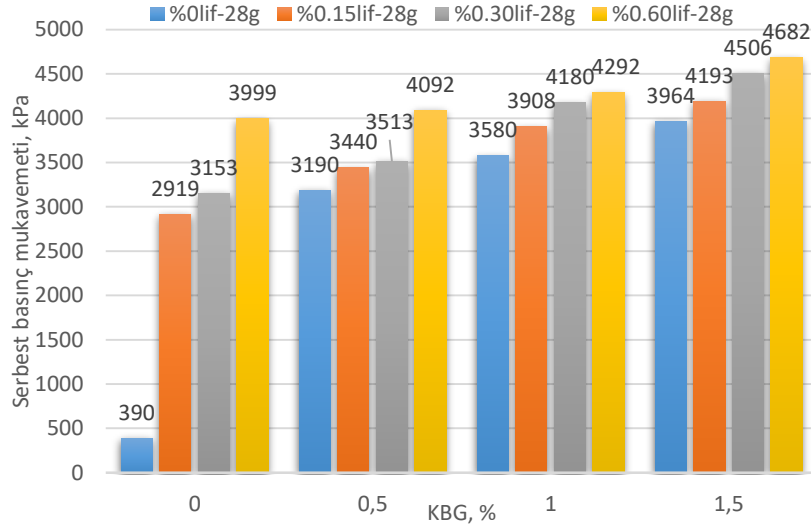
Donma-Çözülme Çevrimleri Sonrası Serbest Basınç Deney Sonuçları

10 çevrim donma-çözülme tabi tutulmuş 1 günlük ve 28 günlük numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş olan serbest basınç deney sonuçları incelendiğinde, biyopolimer ve lif yüzdesi arttıkça donma-çözülme sonrası serbest basınç

mukavemetinin arttığı görülmektedir (Şekil 5, Şekil 6). Doğal kile göre katkılı numunelerin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinde meydana gelen artış yüzdeleri ise Tablo 5' de görülmektedir.



Şekil 3. 1 Günlük Numunelerin Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Değişim



Şekil 4. 28 Günlük Numunelerin Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Değişim

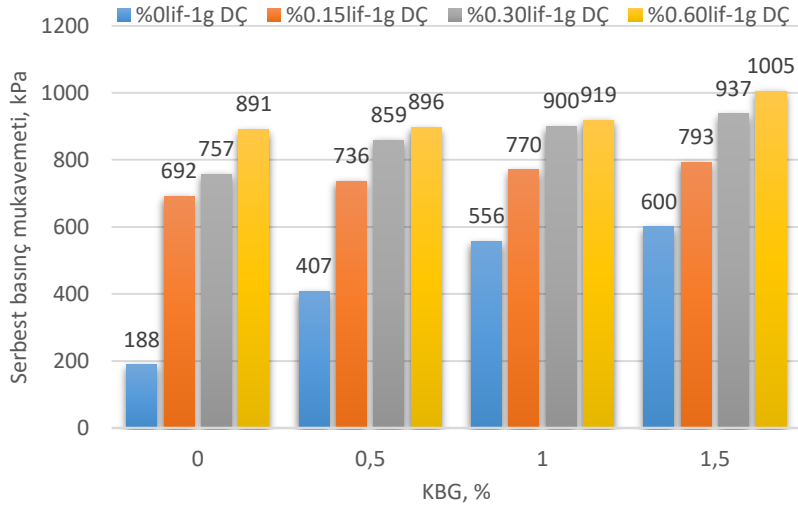
1 günlük numunelerde keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde B1.5-L0.60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinden %435 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde, yalnız %1.5 biyopolimer katkısı (B1.5-L0) %219 oranında, yalnız %0.6 lif katkısı (B0-L0.60) %374 oranında artışa neden olmuştur. 1 gün küre ve 10 çevrim donma-çözölmeye tabi tutulan %1.5 biyopolimer-%0.6 lif katkılı numunenin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin (1005kPa), yalnız biyopolimer (600kPa) ve yalnız lif (891kPa) katkılı numunelerin serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla %67.5 ve %13 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur.”

28 günlük numunelerde keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi incelendiğinde B1.5-L0.60 numunesinin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinden %1259 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Doğal kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinde, yalnız %1.5 biyopolimer katkısı (B1.5-L0) %938 oranında, yalnız %0.6 lif katkısı (B0-L0.60) %607 oranında artışa neden olmuştur (Tablo 5). 28 gün küre ve 10 çevrim donma-çözölmeye tabi tutulan %0.6 lif-%1.5 biyopolimer katkılı numunenin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetinin (2554kPa), yalnız biyopolimer (1952kPa) ve lif (1330kPa) katkılı numunenin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetlerinden sırasıyla %31 ve %92 oranında daha yüksek olduğu bulunmuştur. Donma-çözülme zemin iskeletinde ve dane yapısında değişikliğe neden olmakta ve buna bağlı olarak donma-çözülme etkisi altında zeminin

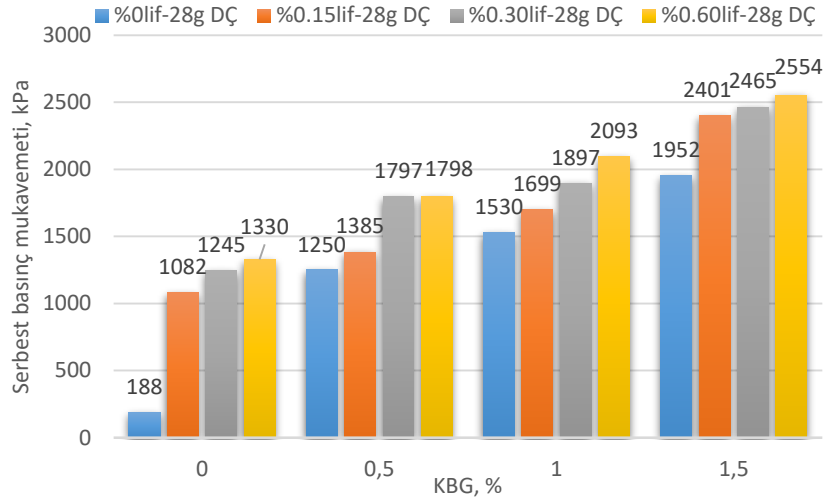
dayanımı değişmektedir (Hohmann-Porebska, 2002). Lif ve biyopolimer katkısının kilin donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Lif takviyesi, donma-çözülme döngülerinin etkilerini azaltmaktadır (Liu vd., 2020). Biyopolimer ile iyileştirilmiş zeminin boşluklarında oluşan ve danelerin etrafını saran hidrojel, donma-çözülme sırasında zeminin nem kaybını azaltır (Hamza vd., 2023). Bu nedenle donma-çözülme davranışı iyileşir.

Tablo 4. Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Artış Yüzdeleri

Numune	1 gün	28 gün
B0-L0	0	0
B0.5-L0	28	718
B1-L0	91	818
B1.5-L0	132	916
B0-L0.15	117	648
B0-L0.3	152	708
B0-L0.6	188	925
B0.5-L0.15	121	782
B1-L0.15	173	902
B1.5-L0.15	175	975
B0.5-L0.3	176	801
B1-L0.3	181	972
B1.5-L0.3	257	1055
B0.5-L0.6	208	949
B1-L0.6	231	1001
B1.5-L0.6	280	1101



Şekil 5. 1 Günlük Numunelerin Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Değişim



Şekil 6. 28 Günlük Numunelerin Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Değişim

Tablo 5. Donma-Çözülme Sonrası Serbest Basınç Mukavemetlerinde Meydana Gelen Artış Yüzdeleri

Numune	1 gün	28 gün
B0-L0	0	0
B0.5-L0	116	565
B1-L0	196	714
B1.5-L0	219	938
B0-L0.15	268	476
B0-L0.3	303	562
B0-L0.6	374	607
B0.5-L0.15	291	637
B1-L0.15	310	804
B1.5-L0.15	322	1177
B0.5-L0.3	357	856
B1-L0.3	379	909
B1.5-L0.3	398	1211
B0.5-L0.6	377	856
B1-L0.6	389	1013
B1.5-L0.6	435	1259

SONUÇLAR

Bu çalışmada, kil bir zemine farklı yüzdelerde keçiyoynuzu gam (%0.5, %1 ve %1.5) ve 5mm uzunluğunda kesilmiş polyester iplik (%0.15, %0.30 ve %0.60) ilave edilerek katkılı killer elde edilmiştir. Elde edilen katkılı killer 1 gün ve 28 gün küre tabi tutulmuştur. Küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç mukavemetleri ve 10 çevrim donma-çözülme tabi tutulmuş numunelerin serbest basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- 28 gün küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerleri, 1 gün küre tabi tutulan numunelerin serbest basınç mukavemeti ve donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha yüksektir.

- Keçiyoynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi, doğal kilin 390kPa olan serbest basınç mukavemetini, 1 gün küre tabi tutulan %1.5 keçiyoynuzu gam ve %0.6 polyester iplik katkılı numunede, 1482kPa değerine artırmıştır. 28 günlük numunede ise bu değer 4682kPa olarak bulunmuştur.

- Keçiyoynuzu gam ve polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artış ile serbest basınç mukavemetleri artmıştır. Doğal kilde 390kPa olan serbest basınç mukavemeti, 1 gün küre tabi tutulan %0.5, %1 ve %1.5 keçiyoynuzu gam katkılı numunelerde, sırasıyla 498kPa, 746kPa ve 903kPa değerlerini almıştır. %0.15, %0.30 ve %0.60 lif katkılı numunelerde ise serbest basınç mukavemetleri, 846kPa, 982kPa ve 1123kPa'dır. 28 günlük %0.5, %1 ve %1.5 keçiyoynuzu gam katkılı numunelerde, serbest basınç mukavemetleri, 3190kPa, 3580kPa ve 3964kPa iken %0.15,

%0.30 ve %0.60 lif katkılı numunelerde ise serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 2919kPa, 3153kPa ve 3999kPa olarak belirlenmiştir.

- Keçiboynuzu gam ve polyester ipliğin ortak etkisi, doğal kilde 188kPa olan donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetini, 1 gün küre tabi tutulan %1.5 keçiboynuzu gam ve %0.6 polyester iplik katkılı numunede, 1005kPa değerine artırmıştır. 28 günlük numunede ise bu değer 2554kPa olarak bulunmuştur.

- Keçiboynuzu gam ve polyester iplik yüzdesinde meydana gelen artış ile donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri artmıştır. Doğal kilde 188kPa olan donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti, 1 gün küre tabi tutulan %0.5, %1 ve %1.5 keçiboynuzu gam katkılı numunelerde, sırasıyla 407kPa, 556kPa ve 600kPa değerlerini almıştır. %0.15, %0.30 ve %0.60 lif katkılı numunelerde ise donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri, 692kPa, 757kPa ve 891kPa'dır. 28 günlük %0.5, %1 ve %1.5 keçiboynuzu gam katkılı numunelerde, donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemetleri, 1250kPa, 1530kPa ve 1952kPa iken %0.15, %0.30 ve %0.60 lif katkılı numunelerde ise serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 1082kPa, 1245kPa ve 1330kPa olarak belirlenmiştir.

Deney sonuçları, bir biyopolimer olan keçiboynuzu gam ile sentetik bir lif olan polyester ipliğin bir arada kullanılmasının özellikle soğuk iklimlere maruz bölgelerde yer alan yüksek plastisiteli killerin donma-çözülme çevrimlerinden daha az etkileneceğini göstermektedir. Bu çalışma kapsamında, %1.5 keçiboynuzu gam-%0.6 polyester iplik katkılarının ortak etkisi ile elde edilmiş olan numunenin en yüksek serbest basınç mukavemeti ve en yüksek donma-çözülme sonrası serbest basınç mukavemeti değerine sahip olmasından dolayı soğuk iklim bölgelerinde yapılacak iyileştirmelerde belirtilen oranlar kullanılarak donma-çözülme karşı dayanım sağlanabileceği söylenebilir. İlerleyen çalışmalarda, lif ve biyopolimer katkılı killerin şişme-oturma ve eğilme davranışlarının da incelenmesi ve mekanizmanın tam olarak anlaşılabilmesi için mikro analizlerin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Akbulut, R. K., & Zaimoğlu, A. Ş. (2019). Effect of aspect ratio on the freezing thawing of a CH clay. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknik Dergisi*, 7, 66-74. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2019.182>
- Ayeldeen, M. K., Negm, A. M., El Sawwaf, M. A. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 371. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2366-1>
- Ayhan, A. (2011). Biyopolimer Katkıları İle Zeminlerin Mühendislik Özelliklerinin İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- ASTM D 2166-00, 2000. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM West Conshohocken, PA.
- Chang, I., Im, J., & Cho, G.C. (2016) Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 251. <https://doi.org/10.3390/su8030251>
- Chang, I., Im, J., Prasadhi, A. K., & Cho, G.C. (2015b) Effects of xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *Construction and Building Materials*, 74, 65-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- Chang, I., Lee, M., Tran, A. T. P., Lee, S., Kwon, Y. M., Im, J., & Cho, G. C. (2020). Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*, 24, 100385. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385>
- Chang, I., Prasadhi, A. K., Im, J., & Cho, G. C. (2015a). Soil strengthening using thermo-gelation biopolymers. *Construction and Building Materials*, 77, 430-438. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.116>
- Chen, C., Wei, K., Gu, J., Huang, X., Dai, X., & Liu, Q. (2022). Combined effect of biopolymer and fiber inclusions on unconfined compressive strength of soft soil. *Polymers*, 14, 787. <https://doi.org/10.3390/polym14040787>
- Cheng, Z., & Geng, X. (2021). Soil consistency and interparticle characteristics of various biopolymer types stabilization of clay. *Geomechanics and Engineering*, 27(2), 103-113. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.27.2.103>

- Çelik, S., Ghalehjough, B. K., Majedi, P., & Akbulut, S. (2017). Effect of randomly fiber reinforcement on shear failure surface of soil, behind flexible retaining walls at different conditions. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 46(10), 2097-2104.
- Çelik, S. (2017). An Experimental Investigation of Utilizing Waste Red Mud in Soil Grouting. *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 21(4), 1191-1200. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0774-0>
- Dahale, P. P., Nagarnaik, P. B., & Gajbhiye, A. Y. (2017). Engineering behavior of remolded expansive soil with lime and flyash. *Materials Today: Proceedings*, 4(2017), 10581–10585. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.06.423>
- Dey, P., Maiti, S., & Sa, B. (2012). Locust bean gum and its application in pharmacy and biotechnology: An overview. *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, 4(1), 7-11.
- Ekmen, A. B., Algin, H. M., & Özen, M. (2020). Strength and stiffness optimisation of fly ash-admixed DCM columns constructed in clayey silty sand. *Transportation Geotechnics*, 24, 100364. doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100364
- Fatehi, H., Ong, D. E. L., Yu, J., & Chang, I. (2021). Biopolymers as green binders for soil improvement in geotechnical applications: A review. *Geosciences*, 11, 291. <https://doi.org/10.3390/geosciences11070291>
- Ghazavi, M., & Roustaei, M. (2010). The influence of freeze thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber reinforced clay. *Cold Regions Science and Technology*, 61, 125-131. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- Hamza, M., Nie, Z., Aziz, M., Ijaz, N., Akram, O., Fang, C., Ghani, M. U., Ijaz, Z., Noshin, S., & Madni, M. F. (2023). Geotechnical behavior of high-plastic clays treated with biopolymer: macro–micro-study. *Environmental Earth Sciences*, 82, 91. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10760-2>
- Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 30, 100-116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045>
- Hohmann-Porebska, M. (2002). Microfabric effects in frozen clays in relation to geotechnical parameters. *Applied Clay Science*, 21(2002), 77 – 87. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(01\)00094-1](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(01)00094-1)
- Jamshidi, R., Towhata, I., Ghiassian, H., & Tabarsa, R. (2010). Experimental evaluation of dynamic deformation characteristics of sheet pile retaining walls with fiber reinforced backfill. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(6), 438–446. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2009.12.017>
- Jang, J., (2020). A review of the application of biopolymers on geotechnical engineering and the strengthening mechanisms between typical biopolymers and soils. *Hindawi Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, Article ID: 1465709, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2020/1465709>
- Kalkan, E., & Akbulut, S. (2004). The positive effects of silica fume on the permeability, swelling pressure and compressive strength of natural clay liners. *Engineering Geology*, 73, 145-156. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.001>
- Khatami, H. R., & O’Kelly, B. C. (2013). Improving mechanical properties of sand using biopolymers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(8),1402-1406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.000086](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000086)
- Kurt Albayrak, Z. N., & Altun, B. (2021). Strength properties of biopolymer treated clay/marble powder mixtures. *Challenge Journal Of Concrete Research Letters*, 12(4), 131-137, <https://doi.org/10.20528/cjcr.2021.04.003>
- Kurt Albayrak, Z. N., & Gencer, G. (2021). The usability of clay/pumice mixtures modified with biopolymer as an impermeable liner. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(1), 28-36, <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1053-7>
- Latifi, N., Horpibulsuk, S., Meehan, C. L., Majid, M. Z. A., & Rashid, A. S. A. (2016). Xanthan gum biopolymer: an eco-friendly additive for stabilization of tropical organic peat. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5643-0>
- Liu, C., Lv, Y., Yu, X., & Wu, X. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 48, 581-590. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.004>

- Ma, Q., Yang, Y., Xiao, H., & Xing, W. (2018). Studying shear performance of flax fiber-reinforced clay by triaxial test. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1290572. <https://doi.org/10.1155/2018/1290572>
- Rezaei Fard, A., Moradi, G., Karimi Ghalehjough, B., & Abbasnejad, A. (2020). Freezing-thawing resistance evaluation of sandy soil, improved by polyvinyl acetate and ethylene glycol monobutyl ether mixture. *Geomechanics and Engineering*, 23(2), 179-187. <https://doi.org/10.12989/gae.2020.23.2.179>
- Singh S. P., & Das, R. (2020). Geo-engineering properties of expansive soil treated with xanthan gum biopolymer, *Geomechanics and Geoengineering*, 15(2), 107-122, <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495>
- Smitha, S., & Sachan, A. (2016). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of Sabarmati sand. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 10(4),387-400. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1152674>
- Wiszniewski, M., & Cabalar, A. F. (2014). Hydraulic conductivity of a biopolymer treated sand. *New Frontiers in Geotechnical Engineering*, 243, 19-27. <https://doi.org/10.1061/9780784413456.003>
- Zaimoglu, A. (2010). Freezing–thawing behavior of fine-grained soils reinforced with polypropylene fibers. *Cold Regions Science and Technology*, 60(1), 63-65. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.07.2023
Kabul Tarihi : 28.09.2023

Received Date : 23.07.2023
Accepted Date : 28.09.2023

YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SPEKTROGRAM GÖRÜNTÜLERİNDEN AKAZE YÖNTEMİ İLE SES SAHTECİLİĞİ TESPİTİ

AUDIO FORGERY DETECTION FROM HIGH-RESOLUTION SPECTROGRAM WITH AKAZE METHOD

Beste ÜSTÜBİOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0001-7451-0634)
Gül TAHAOĞLU¹ (ORCID: 0000-0000-0002-8828-5674)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Beste ÜSTÜBİOĞLU

ÖZET

Ses sahteciliği alanında yaygın olarak kullanılan Kopyala-yapıştır sahteciliği, ses içerisindeki bir sesli kısmın kopyalanıp yine aynı ses içerisinde farklı bir konuma yapıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Gelişmiş ses yazılımları sayesinde bu tür bir sahteciliğin uygulanması oldukça kolay olmakla birlikte, saldırganlar tarafından sahtecilik izlerini gizlemek için sahte sese uygulanan son işlem operasyonları bu sahtecilik tespitini oldukça zor hale getirmektedir. Bu amaçla, sestten elde edilen yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntüsü üzerinde anahtar nokta tabanlı bir yaklaşım kullanarak, ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit eden son işlem operasyonlarına dayanıklı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde öncelikle ses dosyasından yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntüsü elde edilir. Ardından, Akaze yöntemi ile spektrogram görüntüsünden anahtar noktalar ve özellik tanımlayıcıları çıkarılmaktadır. Çıkarılan özellikler g2NN algoritması ile eşleştirilmektedir. Spektrogram üzerindeki noktaların ses üzerine iz düşürülmesiyle de ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin son işlem operasyonları uygulansa dahi literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında çok yüksek doğrulukla ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespitini yaptığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Akaze, Spektrogram, Ses sahteciliği.

ABSTRACT

Copy-paste forgery, which is widely used in the field of audio forgery, is created by copying an audio part in the audio and pasting it in a different location in the same audio. While this type of forgery is quite easy to implement thanks to advanced audio software, post-processing operations applied to forged audio by attackers to hide traces of forgery make this forgery detection extremely difficult. For this purpose, a new post-processing-robust method for detecting audio copy-paste forgery using a key point-based approach on the high-resolution spectrogram image obtained from the audio is proposed. In the proposed method, firstly, a high-resolution spectrogram image is obtained from the audio file. Then, with the Akaze method, key points, and feature descriptors are extracted from the spectrogram image. Extracted features are matched with the g2NN algorithm. Audio copy-paste forgery is detected by tracing the key points on the spectrogram onto the audio. The results obtained show that the proposed method detects audio copy-paste forgery with very high accuracy when compared to the studies in the literature, even if post-processing operations are applied.

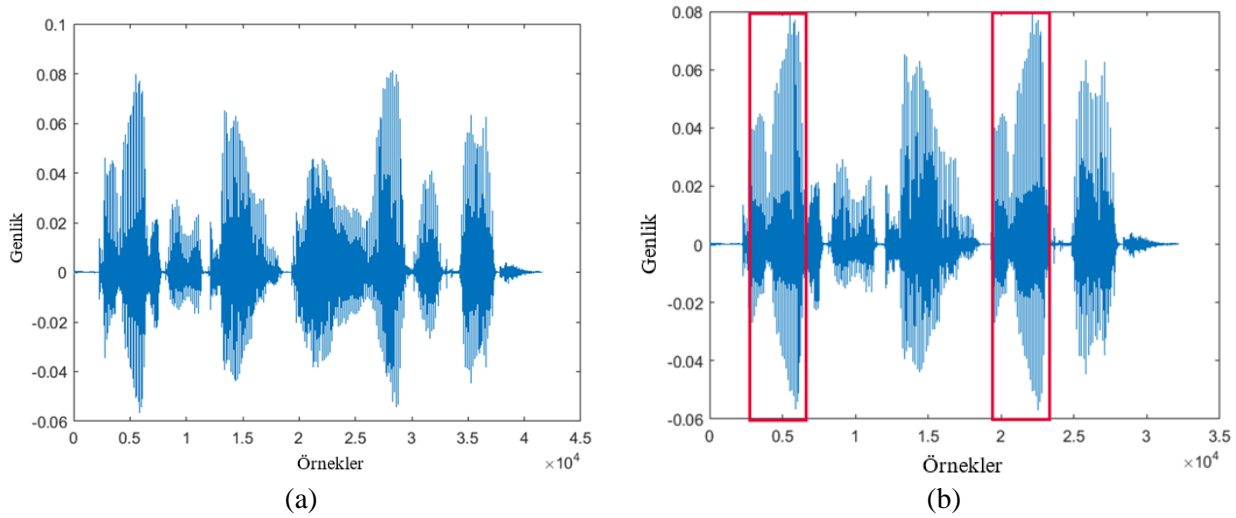
Keywords: Akaze, Spectrogram, Audio forgery.

ToCite: ÜSTÜBİOĞLU, B., & TAHAOĞLU, G., (2023). YÜKSEK ÇÖZÜNÜRLÜKLÜ SPEKTROGRAM GÖRÜNTÜLERİNDEN AKAZE YÖNTEMİ İLE SES SAHTECİLİĞİ TESPİTİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 962-971.

GİRİŞ

Dijital ses kayıtları telefon kayıtları, sesli mesajlar, müzik dosyaları gibi günlük hayatımızın her yerinde karşımıza çıkmaktadır. Dijital ses kayıtlarının hukuk davalarında delil olarak kullanıldığı ve hatta bazı davalarda bu delillerin kilit rol oynadığı düşünülürse, ses kayıtlarının sahte olup olmadığının tespiti büyük önem arz etmektedir.

Gelişmiş ses düzenleme yazılımlarının kolay kullanılabilirliği sayesinde, bir saldırgan uzman sahtecilik yöntemleri ile sahte ses kayıtları oluşturabilmektedir. Bu sahtecilik yöntemlerinden bir tanesi de Kopyala-yapıştır sahteciliğidir. Kopyala-yapıştır sahteciliğinde, ses kaydı içerisindeki bir kelime kopyalanıp yine aynı konuşma kaydı içerisinde başka bir kelime üzerine yapıştırılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Şekil 1’de kopyala-yapıştır sahteciliğine örnek bir ses kaydı verilmiştir. Sahte ses oluşturmak için Şekil 1(a)’da TIMIT veri tabanından alınan orijinal konuşma kaydındaki (“sa2.wav”) birinci sözcük kopyalanmış ve aynı konuşma kaydında dördüncü sözcüğün yerine yapıştırılarak Şekil 1(b)’deki sahte ses elde edilmiştir.



Şekil 1. a. Orijinal Ses b. Kopyala-yapıştır Sahteciliği ile Oluşturulmuş Sahte Ses.

Şekilden de görüleceği üzere diğer ses sahteciliği türlerinden farklı olarak kopyala yapıştır sahteciliğinde kopyalanan kısım farklı bir ses kaydına değil, aynı ses kaydı içerisindeki başka bir kısma yapıştırılmaktadır. Bu durumda, sesle ilgili temel özellikler (genlik, frekans, uzunluk, gürültü, ton) aynı ses kaydındaki kopyala-yapıştır yapılmış kelimeler için değişmeyecektir. Ses kaydının bir uzman tarafından dilbilimsel veya ses bilimsel olarak manuel bir şekilde analizinin yapılmadığı durumda sesin otomatik olarak orijinal veya sahte olarak değerlendirilmesi zor hale gelecektir. Kopyala yapıştır sahteciliğinin tespitini zorlaştıran bir başka durum ise saldırgan tarafından sahtecilik izlerini gizlemek için uygulanan son işlem operasyonlarıdır (sıkıştırma, gürültü ekleme, medyan filtreleme vb.). Çünkü son işlem operasyonları sesin dalga biçimini değiştirmekte bu da sahtecilik tespitini zorlaştırmaktadır.

Bir ses kaydının bir manipülasyona maruz kalıp kalmadığının değerlendirilmesinde literatürde fen bilimleri ve sosyal bilimleri olmak üzere farklı disiplinlerin bakış açılarıyla da ele alınması gereken önemli bir problem olarak görülmüştür (Burucu, 2023). Literatürde ses sinyaline ilişkin özelliklerin algoritmik olarak değerlendirilmesi ile kopyala-yapıştır sahteciliği tespiti alanında yapılan çalışmalar VAD (ses aktivite tespiti) ve pencere tabanlı yöntemler olarak iki kategoriye ayrılmaktadır. VAD tabanlı yöntemlerde; önerilen VAD algoritması ile ses dosyası sesli ve sessiz kısımlara ayrılmakta sonrasında bu sesli kısımlardan öznitelikler çıkarılmaktadır. Çıkarılan özelliklerin benzerliklerine göre de sesteki tekrarlanan kelimeler tespit edilmektedir. Pencere tabanlı yöntemlerde ise sesteki sesli/sessiz kısımlar çıkartılmak yerine, ses dosyası eşit uzunluktaki örtüşen ve örtüşmeyen pencerelere bölünmekte ve pencerelerden özellik çıkarılmaktadır. Benzer özelliklere sahip pencereler, tekrarlanan pencereler olarak işaretlenmektedir.

Pencere tabanlı yöntemler: (Xiao vd., 2014), septe tekrarlanan kelimeleri tespit etmek için ses dosyasını T süreli pencerelere bölmüştür. Önerdikleri benzerlik fonksiyonu ile bu çerçeveler arasındaki benzerliğe göre tekrarlanan kelimeleri işaretlemiştir.

VAD tabanlı yöntemler: Huang vd. (Huang vd., 2020), öncelikli olarak belirledikleri VAD algoritmasıyla ses dosyasının sesli kısımlarını belirlemiştir. Ayrık Fourier dönüşümü (DFT) ve Mel-Frekans Cepstral Katsayıları

(MFCC) yöntemlerinden faydalanarak bu sesli kısımlardan özellik çıkarmışlardır. Benzer özelliklere göre kopyala-yapıştır yapılmış kelimeyi tespit etmişlerdir. Wang vd. (Wang vd., 2010) Tekil Değer Ayırıştırma (SVD) dönüşümüne dayalı bir yöntem önermiştir. Sesli kısımlardan özellik olarak Ayrık Kosinüs Dönüşümü (DCT) katsayıları elde edilmiştir. Sonrasında, belirli bir özvektörü elde etmek için DCT katsayılarının kare matrisine tekil değer ayırıştırma (SVD) dönüşümünü uygulamışlardır.

(Xie vd., 2018) birden çok özellik kullanarak karar ağacı yaklaşımı ile ses kopyala-yapıştır sahteciliğini tespit eden bir yöntem önermişlerdir. Yöntemde, sesli kısımlardan Gamaton, Mel-frekans cepstral katsayıları (MFCC), perde (pitch) ve ayrık Fourier dönüşümü (DFT) katsayıları olmak üzere 4 ayrı özellik çıkarılmış ve bu özelliklerin benzerliklerine göre dört ayrı tespit sonucu elde edilmiştir. Tespit sonuçlarını birleştirmek için ise C4.5 karar ağacını kullanılmıştır.

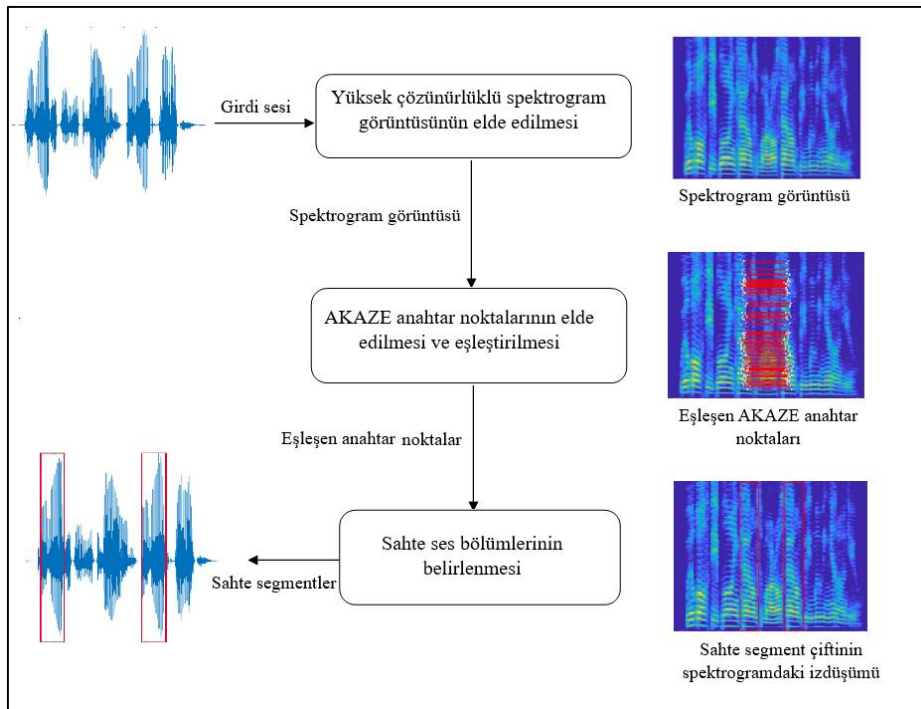
(İmran vd. 2017), ses dosyasındaki sesli kısımları belirlemek için bir VAD yöntemi önermişler ve bu kısımlardan özellik çıkarmak için 1 boyutlu yerel ikili model (LBP) yöntemini uygulamışlardır. Yöntemde tekrarlanan kelimelerin bulunması için sesli kısımlardan çıkarılan LBP histogramları birbirleri ile kıyaslanmıştır.

(Yan vd., 2014), sestten YAAPT yöntemi ile temel frekans dizisini çıkarmıştır. Temel frekans dizilerinin benzerliklerini hesabında ise ortalama mesafe ve faz korelasyonu yöntemlerinden faydalanılmıştır. Yan vd. (Yan vd., 2019) yaptığı bir diğer çalışmada perde dizileri yanında format dizileri de kullanılmıştır. Çıkarılan özelliklerin benzerlik hesabında ise Dinamik zaman atlama (DTW) yönteminden faydalanılarak sesteki kopyala-yapıştır sahteciliği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, son işlem operasyonlarına dayanıklı yeni bir ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde, şüpheli sesteki sahte kısımları tespit etmek için giriş sesinin yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntüsünden faydalanılmaktadır. Bunun için öncelikle Akaze yöntemi ile spektrogram görüntüsünden anahtar noktalar ve özellik tanımlayıcıları çıkarılmakta ve çıkartılan özellikler g2NN algoritması ile eşleştirilmektedir. Yanlış eşleşmeler elendikten sonra kalan eşleşmeler spektrogram üzerinde tekrarlanan kelimelere karşılık gelmektedir. Spektrogram üzerindeki noktaların ses üzerine iz düşürülmesiyle de ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespit edilmektedir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında çok yüksek doğrulukla sahtecilik tespiti yaptığını göstermektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada ataklara karşı dayanıklı yeni bir kopyala-yapıştır sahteciliği uygulanmış seslerin tespit yöntemi sunulmaktadır. Şekil 2’de görüldüğü gibi önerilen yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, giriş sesinin yüksek çözünürlüklü spektrogram temsili elde edilmektedir. Sesteki tekrarlanan bölümlerin aranması, elde edilen spektrogram görüntüsü aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada ise spektrogram görüntüsünün tamamından anahtar noktaları elde edilmekte ve eşleştirilmektedir.



Şekil 2. Önerilen Yöntem

Önerilen yöntemin ataklara karşı dayanıklılığı sağlamak için anahtar nokta çıkarımında AKAZE yönteminden faydalanılmıştır. Anahtar nokta çıkarımından sonra anahtar noktalarının özelliklerini barındıran özellik tanımlayıcı vektörler kullanılarak en benzerlerinin eşleştirilmesi sağlanmıştır. Olası hatalı eşleşmelerin elenmesi de yine bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Üçüncü aşama olan son aşamada ise, eşleşen kaynak ve hedef bölgelerde yer alan anahtar noktalarının x koordinatlarından faydalanılmıştır. Spektrogram üzerindeki kaynak ve hedefteki noktaların x koordinatlarının orta noktaları, sese iz düşürülerek seste kopyala-yapıştır yapılan segmentler tespit edilmiştir. Bu aşamalarda kullanılan yaklaşımların detayları şu alt başlıklar halinde sunulmuştur;

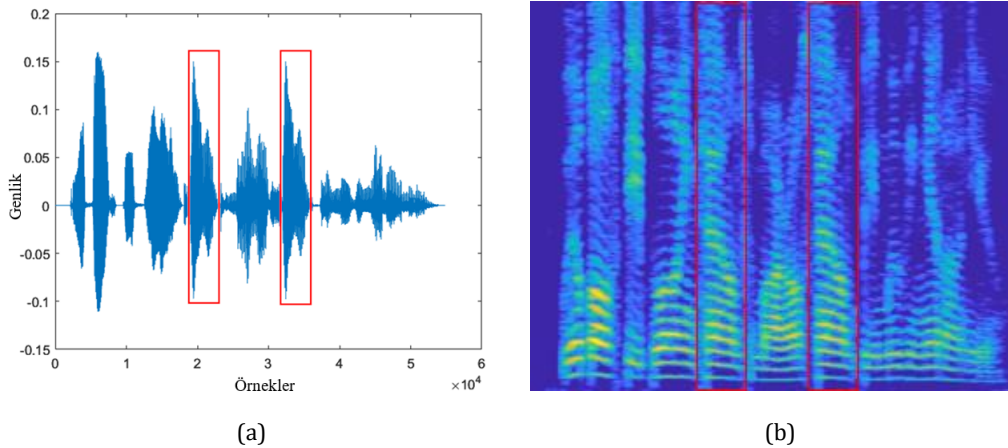
- i. Yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntülerinin elde edilmesi,
- ii. AKAZE anahtar noktalarının elde edilmesi ve eşleştirilmesi,
- iii. Sahte ses segmentlerinin belirlenmesi.

Yüksek Çözünürlüklü Spektrogram Görüntülerinin Elde Edilmesi

Ses sinyalinin görsel temsilinde, Kısa süreli Fourier dönüşümü (Short Time Fourier Transform, STFT) tabanlı spektrogram çıkarma yaklaşımı en yaygın kullanılan yaklaşımlardan biridir. STFT tabanlı yaklaşımlar, esas olarak zaman ve frekans çözünürlükleri arasındaki değişiklikleri kullanırlar. Bu çalışmada hem zaman hem de frekansta aynı anda yüksek çözünürlük sağlayan spektrogram çıkarma tekniğini kullanılmıştır (Nam vd., 2017). Yöntem, Olasılıksal Gizli Bileşen Analizi' ni (Probabilistic Hidden Component Analysis, PLCA), biri yüksek zaman çözünürlüğüne sahip, diğeri ise Eşleştirilmiş PLCA (Coupled PLCA) adlı yüksek frekans çözünürlüğüne sahip iki spektrogramı birlikte ayrıştırmak için genişletir. Bu ayrıştırma adımı sayesinde zaman ve frekans açısından yüksek çözünürlük oluşturulmaktadır. PLCA, bir spektrogramı negatif olmayan spektral ve zamansal bileşenlerin dış çarpımlarının bir toplamına ayrıştırmak için kullanılır. V_{ft} 'nin temsil edildiğini varsayarsak, f , t 'de (1)'de verildiği gibi elde edilir.

$$V_{ft} = \gamma \sum_z P(z)P(f | z)P(t | z) \quad (1)$$

Burada, $P(f|z)$ spektral bileşenleri, $P(t|z)$ ise karşılık gelen spektral bileşenlerin zaman içinde varlığını belirten zamansal bileşenleri temsil etmektedir. Spektrogram esas olarak çok terimli dağılımların parametreleri tahmin edilerek ayrıştırılabilir. Bu tahmin, Beklenti Maksimizasyonu (EM) algoritması kullanılarak gerçekleştirilir. PLCA, yalnızca zaman veya frekans alanı için kullanılır, her ikisi için kullanılamaz. Yüksek frekans çözünürlüklü spektrogramı hesaplamak için, Çiftli PLCA kullanılmaktadır (Nam vd., 2017). Örnek olarak Şekil 3'te kopyala-yapıştır sahteciliği uygulanmış sahte ses ve bu sestten elde edilmiş yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntüsü verilmiştir. Şekil 3'te görülen kırmızı çerçeveler kopyala-yapıştır yapılmış segmentleri göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere sahte sesin yüksek çözünürlüklü spektrogram görüntüsünde sahte segmentler oldukça kolay bir şekilde ayırt edilebilmektedir.



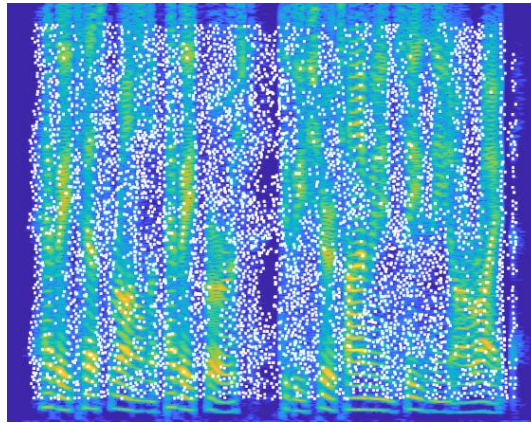
Şekil 3. a. Kopyala-yapıştır Sahteciliği Uygulanmış Sahte Ses. **b.** Sesten Elde Edilen Yüksek Çözünürlüklü Spektrogram.

AKAZE Algoritması ile Anahtar Noktalarının Elde Edilmesi ve Eşleştirilmesi

Spektrum görüntüsünden anahtar nokta çıkarımında AKAZE yönteminden faydalanılmıştır. Kullanılması önerilen bu yöntem doğrusal olmayan ölçek uzayı kullanarak anahtar noktaları elde etmektedir (Alcantarilla vd. 2013). AKAZE yöntemi temel olarak aşağıdaki adımları içermektedir.

- i. FED (Fast Explicit Diffusion) döngüsüne dayalı doğrusal olmayan ölçek uzayının oluşturulması,
- ii. Ölçeklendirilmiş Hessian matrisine dayalı anahtar noktalarının çıkarılması,
- iii. M-LDB(Modified Local Difference Binary) özellik tanımlayıcılarının elde edilmesi.

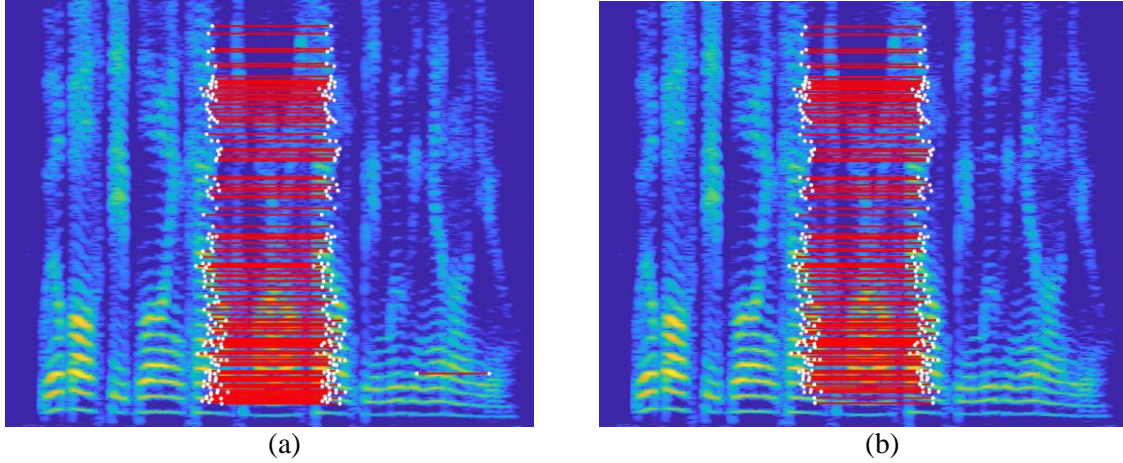
Anahtar nokta elde etme yaklaşımlarından olan SIFT ve SURF algoritmalarının temelinde çoklu Gauss ölçek uzayı kullanılmaktadır. Bu ölçek uzayı kullanımı adımı SIFT algoritmasında piramitsel yapı oluşturma amacı ile gerçekleştirilir. SURF yönteminde de kutu filtreleri aracılığıyla yaklaşık Gauss türevleri kullanılmaktadır. Bu iki yaklaşımda da Gauss bulanıklaştırması ile detaylar ve gürültü aynı seviyede bulanıklaştırılır. Bu problemi çözümlenebilmek için başlangıçta aynı yazarlar tarafından KAZE yöntemi önerilmiştir (Alcantarilla vd., 2012). Yöntem doğrusal olmayan difüzyon denklemlerini çözmek için Additive Operator Splitting (AOS) yaklaşımını kullanmaktadır. Ancak bu yaklaşım yüksek hesaplama karmaşıklığı problemini doğurmuştur. Bu yöntemi hızlandıran Fast Explicit Diffusion (FED) matematiksel yapısı kullanılarak Hızlandırılmış KAZE (AKAZE) olarak adlandırılan AKAZE yöntemi ortaya çıkmıştır (Alcantarilla vd., 2013). Elde edilen anahtar noktalarına ait özellik tanımlayıcıların elde edilmesinde Modified Local Difference Binary (MLDB) algoritması önerilmiştir. Algoritmanın icrası sonrası her bir anahtar noktası için 1x486 boyutunda özellik tanımlayıcı vektör elde edilmiş olur. Şekil 4'te, Şekil 3(b)'de verilen sahte sese ait spektrum görüntüsünden çıkarılan AKAZE anahtar noktaları gösterilmiştir. Bu görüntüde 5852 adet anahtar noktası elde edilmiştir.



Şekil 4. Sahte Sesten Elde Edilen Spektrumdan Çıkarılan Anahtar Noktalar.

Bir sonraki aşamada elde edilen anahtar noktalarına ait 486 boyutlu özellik tanımlayıcı vektörlerinin, $f_1 \dots f_n$, elde edilmesi gerçekleştirilmektedir. Bu özellik vektörlerinde anahtar noktasına ait koordinat bilgisi de yer almaktadır. Elde edilen bu vektörlerin eşleştirme işlemi (Amerini vd., 2011) önerilen hiyerarşik kümeleme yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşıma göre mevcut f_i özellik vektörünün diğer özellik vektörleri ile arasındaki Öklid uzaklığı hesaplanmakta ve $D = d_1, d_2, \dots, d_{n-1}$ uzaklık vektörü oluşturulmaktadır. f_i vektörüne en yakın özellik vektörü ile ikinci en yakın özellik vektörü arasında bir T eşik değeri ile karşılaştırma yapılır. $d_1 / d_2 > T, T \in (0,1)$ şartını sağlayan özellik vektörleri eşleştirilir. Yapılan çalışmada T eşik değeri 0,6 olarak belirlenmiştir.

Olası hatalı eşleşmelerin giderilmesi için RANSAC (Random Sample Consensus yaklaşımından faydalanılmıştır. Bu yaklaşım ile yüksek oranda yanlış eşleşmelere sahip veri setindeki hatalar minimize edilir (Fischler vd., 1981). Üretilen modele ait parametrelerin tahmini için en az sayıda veri içeren küme kullanılır ve model ile tutarlı veriler ile bu küme genişletilerek aday çözümler özyinelemeli olarak üretilir. İterasyon tamamlanması ile üretilen modele uygun noktalar doğru eşleşme, uygun olmayan eşleşmeler ile hatalı eşleşme olarak değerlendirilir. Şekil 5'te kopyala yapıştır sahteciliği uygulanmış sahte sesin spektrum temsili üzerindeki anahtar nokta eşleşmelerinde hatalı işaretlemenin giderilmesi örneğine ilişkin görsel sunulmuştur. Şekil 5(a)' da siyah oval içine alınmış eşleşme hatalı eşleşmedir ve önerilen yaklaşımın uygulanması ile bu yanlış pozitif işaretlemenin giderildiği görülmektedir. Eleme sonrası eşleşmeler 5(b)'de sunulmuştur.



Şekil 5. Ransac ile Hatalı Eşleşen Noktanın Elenmesi Örneği **a.** Ransac Öncesi **b.** Ransac Sonrası.

Sahte Ses Parçalarının Belirlenmesi

Olası hatalı eşleşmelerin giderilmesi için RANSAC (Random Sample Consensus yaklaşımından faydalanılmıştır. Bu yaklaşım ile yüksek oranda yanlış eşleşmelere sahip veri setindeki hatalar minimize edilir (Fischler vd., 1981). Üretilecek modele ait parametrelerin tahmini için en az sayıda veri içeren Anahtar noktaların eşleştirilmesi ve hatalı eşleşmelerin elenmesinden sonra, spektrogram üzerindeki noktaların iki küme halinde öbeğlendiği görülmektedir. Bu iki öbek sesteki tekrarlanan kısımlara karşılık gelmektedir. Spektrogram üzerindeki eşleşen noktaların ses üzerinde hangi kısma karşılık geldiğini tespit etmek için, eşleşen noktalar ses üzerine iz düşürülmüştür. Bunun için öncelikle kümelerdeki anahtar noktaların x koordinatlarının ortalaması alınmaktadır. Daha sonra iki küme için hesaplanan orta noktalar M1 ve M2' in spektrogram genişliğine bölünüp, sesteki eleman sayısı ile çarpılmasıyla bu noktalar sese iz düşürülmektedir. Son olarak ise bu noktaların seste hangi segmentte yer aldığı araştırılarak kopyala-yapıştır yapılmış segmentler işaretlenmektedir.

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, önerilen yöntemin performans sonuçları hakkında ayrıntılı bilgiler verilmekte ve son teknoloji yöntemler sunulmaktadır. Öncelikle kullanılan veri seti ve değerlendirme metrikleri verilmiş, ardından karşılaştırmalı performans değerlendirme raporları sunulmuştur.

Kullanılan Veri tabanı Ve Metrikler

Bu çalışmada, TIMIT konuşma veri tabanından oluşturulan ses kopyala-yapıştır veri tabanı kullanılmıştır (Ustubioglu vd., 2022). TIMIT veri tabanı, iki saniyeden altı saniyeye kadar İngilizce konuşmaları içermektedir. Ses kayıtlarının örnekleme hızı 8 kHz'dir. Bu veri tabanında yer alan ses kayıtları sessiz ortamda kaydedilmiş olup gürültü içeriğine sahip değildir. Oluşturulan kopyala-yapıştır veri tabanında, ses içerisindeki bir segment rastgele kopyalanmakta ardından aynı sesteki rastgele bir başka konuma yapıştırılarak sahte ses dosyası oluşturulmaktadır. Her sahte segment, yaklaşık 0,2 saniye ila 0,6 saniye uzunluğundadır. Veri tabanında bu sahtecilik türü ile oluşturulmuş ek atak içermeyen 368 adet sahte ses dosyası yer almaktadır. Ayrıca sahte seslere yaygın olarak kullanılan bazı son işleme işlemlerini uygulanmıştır bu ataklara ilişkin bilgiler şu şekildedir: 30 dB ve 20 dB beyaz Gauss gürültüsü, medyan filtre, 32 kbps ve 64 kbps sıkıştırma. Ataklı sahte sesler dâhil olmak üzere toplam 2208 adet sahte ses dosyası mevcuttur.

$$\text{Kesinlik (Precision)} = \frac{DP}{DP + YP}$$

$$\text{Duyarlılık, DPO(Recall, TRP)} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (2)$$

$$F - \text{ölçütü} = 2x \frac{\text{Kesinlik} \cdot \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}}$$

Yöntemlerin performans değerlendirmesinde Precision, Recall ve F-measure metrikleri kullanılmıştır. Dikkate alınan metrikler Denklem (2)'de verilmiştir. Kullanılan parametrelerin anlamları Tablo 1'de verilmiştir.

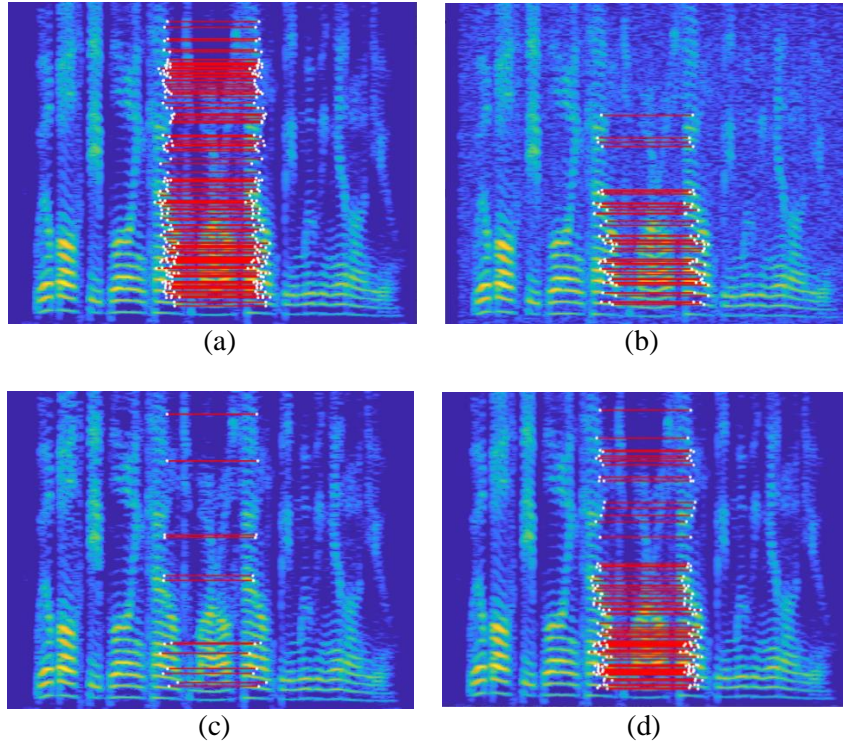
Tablo 1. Değerlendirme Metriklerindeki Kısaltmaların Anlamı.

Kısaltma	Anlamı
DP	Gerçekte sahte olup sahte olarak etiketlenen ses sayısı
YP	Orjinal olup sahte olarak etiketlenen ses sayısı
YN	Sahte olup orjinal olarak etiketlenen ses sayısı

Keskinlik metriği, bütün sesler arasından sahte olarak tespit edilen seslerin oranını temsil ederken, Duyarlılık metriği sahte sesler arasından sahte olarak tespit edilen seslerin oranını temsil etmektedir. F-ölçütü metriği ise Keskinlik ve Duyarlılık metriklerinin harmonik ortalamasıdır hem yanlış pozitifleri hem de yanlış negatifleri tek bir değerle hesaba katar. Bu üç metrik de 0 ile 1 arasında değerlerdir. Bu metriklerin 1'e yakın olması daha yüksek performansı temsil etmektedir.

Önerilen Yöntemin Performansının Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırılması

Bu bölümde önerilen yöntemin literatürdeki popüler çalışmalardan olan (Ustubioglu vd. 2023), (Imran vd., 2017), (Huang vd., 2020), (Yang vd. 2019) ve (Wang vd., 2010) ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla yapılan tüm ölçümler, Matlab R2019b çalıştıran, 3,4 GHz Intel Core i7 CPU ve 8 GB RAM'e sahip bir masaüstü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemin performansı hem ataksız sahte sesler hem de medyan filtreleme, 20 dB ve 30 dB gürültü ekleme, 32 kbps ve 64 kbps sıkıştırma saldırıları durumunda değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede her bir saldırı tipi için 368 adet ses dosyası kullanılmıştır. İlk olarak önerilen yönteme ait spektrogram görüntüleri üzerindeki anahtar nokta eşleşmelerine ilişkin sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Önerilen Yöntem ile Elde Edilen Eşleşmelere İlişkin Örnek Görsel Sonuçlar **a.** Ataksız **b.** Gürültü Ekleme **c.** Sıkıştırma **d.** Medyan Filtreleme Atığı Uygulanmış Seslerde.

Bunun için veri tabanında yer alan “si1798_5-3” isimli sahte ses dosyasına ait ataklı ve ataksız sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6(a)’da ataksız sestten elde edilen eşleşmelerin yer aldığı görsel verilmiştir. Ataksız sestten elde edilen spektrogramda çözünürlük daha yüksek olduğu için diğer durumlara göre daha yüksek sayıda eşleşme elde edilmiştir. (b)’de 20 dB gürültü ekleme atağı uygulanan sestten elde edilen eşleşmeler yer almaktadır. Atak olmayan duruma göre eşleşme sayısının azaldığı görülse de sahte bölgelerin belirlenmesine yetecek sayıda eşleşme elde edilebilmiştir. (c)’de ise 32 bit sıkıştırma atağı olması durumundaki eşleşmeler verilmiştir. Bu senaryo ile en az sayıda eşleşmenin elde edilmesine rağmen yine de yöntemin sahte bölgeleri doğru bir şekilde işaretlediği görülmektedir. (d)’de yer alan örnek görsel sonuç ise Median filtreleme atağı durumunda elde edilmiştir. Bu durumda da yöntem sesin sahte olduğunu işaretleyebilecek olmasının yanı sıra sahte ses bölümlerini rahatlıkla belirleyebilme performansı göstermiştir.

Önerilen yöntemle ilk karşılaştırma tarafımızca önerilen bir önceki çalışmamız ile yapılmıştır (Ustubioglu vd. 2023). Bu iki yöntem ile elde edilen ortalama Kesinlik, Duyarlılık ve F-ölçütü sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Bir Önceki Çalışmamız ile Performans Karşılaştırması.

Atak türü	Önerilen Yöntem			(Ustubioglu vd. 2023)		
	Kesinlik	Duyarlılık	F ölçütü	Kesinlik	Duyarlılık	F ölçütü
<i>Ataksız</i>	0,99	0,90	0,95	0,89	0,82	0,84
<i>Median filtreleme</i>	0,99	0,87	0,93	0,83	0,80	0,91
<i>20db gürültü</i>	0,99	0,78	0,87	0,82	0,74	0,84
<i>30db gürültü</i>	0,99	0,85	0,91	0,83	0,78	0,86
<i>32 bit sıkıştırma</i>	0,99	0,8	0,89	0,83	0,73	0,86
<i>64 bit sıkıştırma</i>	0,99	0,86	0,92	0,89	0,75	0,89

Her metrik açısından elde edilen en yüksek değerler kalın olarak gösterilmiştir. Tablo 2’den de görüldüğü üzere önerilen yöntem, ataksız durumda en iyi durum senaryosu için daha yüksek performans sonuçlarına sahiptir. Ataksız seslerde önceki çalışmamızda ortalama %89, %82 ve %84 sırasıyla Kesinlik, Duyarlılık ve F-ölçütü elde edilirken, önerilen çalışmada ise %99 Kesinlik, %90 Duyarlılık ve %95 F-ölçütü metrik sonuçları elde edilmiştir. Yöntemin sahte sese atak uygulanması durumunda sonuçlarına bakıldığında ise kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütleri açısından tüm ataklarda daha yüksek performans elde edildiği görülmektedir. Önerilen yöntemden elde edilen performans sonuçlarının tarafımızdan önerilen bir önceki çalışmamıza göre daha yüksek olmasının sebebi bu çalışmada önerilen sahtecilik lokalizasyon algoritmasıdır. Bir önceki çalışmamızda eşleşen anahtar noktalardan x eksenine göre min ve max değere sahip anahtar noktalar alınarak sese izdüşüm gerçekleştiriliyordu. Ancak sese atak uygulanma durumunda anahtar nokta sayısı azalmaktadır. Yeterli anahtar noktası çıkarılamaması sonucunda da min ve max anahtar noktalar ile sahte segmentlerin kaçırılabilme olasılığı oluşmaktadır. Fakat önerilen sahtecilik lokalizasyon algoritmasıyla yukarı da anlatıldığı gibi eşleşen anahtar noktala öbeklerinin orta noktaları alındığı için yeterli sayıda anahtar nokta çıkmasa dahi sahte segmentler işaretlenebilmektedir.

Tablo 3. Yöntemlerin Ortalama Duyarlılık, DPO Değerleri.

Atak türü	Önerilen Yöntem	(Ustubioglu vd., 2023)	(Imran vd., 2017)	(Huang vd., 2020)	(Yan vd., 2019)	(Wang vd., 2010)
<i>Ataksız</i>	0,90	0,82	0,18	0,19	0,23	0,22
<i>Median filtreleme</i>	0,87	0,80	0,10	0,21	0,28	0,22
<i>20db ile gürültü ekleme</i>	0,78	0,74	0,17	0,1	0,37	0,25
<i>30db ile gürültü ekleme</i>	0,85	0,78	0,19	0,16	0,31	0,29
<i>32 bit sıkıştırma</i>	0,80	0,73	0,20	0,20	0,31	0,29
<i>64 bit sıkıştırma</i>	0,86	0,75	0,20	0,19	0,30	0,30

Tablo 3’te önerilen yöntemin ve literatürdeki popüler çalışmaların ortalama Duyarlılık, DPO sonuçlarına yer verilmiştir. Önerilen yöntem ile atak olmaması durumunda %90 oranında başarımla yakalanırken ataklı sahte seslerin tespit edilmesinde bu değer %78-87 arasındadır. Referans çalışmalardan, (Ustubioglu vd. 2023) ile nispeten daha yakın performans sonuçları elde edilse de diğer yöntemlerin bu veri seti üzerindeki performans düşüklüğü göze çarpmaktadır. Bunun sebebi ise diğer yöntemlerin önerdikleri algoritmaların genelleme yeteneklerinin olmaması olarak görülmektedir. Çünkü kendi veri setlerinde rapor edilen değerler oldukça yüksektir. Farklı bir veri setinden ses ile test edildiğinde bu algoritmaların performansı görüldüğü gibi oldukça düşmektedir. Elde edilen sonuçlar

gözden geçirildiğinde önerilen yöntemin ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespitinde literatürdeki diğer çalışmalara göre üstün bir performans gösterdiği görülmektedir. Yine önerilen yöntemin saldırganlar tarafından sahtecilik izlerini gizlemek adına yapılan son işlem operasyonları da oldukça dayanıklı olduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Çalışmada, ses kopyala-yapıştır sahteciliği tespiti için yeni bir yöntem önerilmiştir. Giriş sesi, yüksek frekans özelliklerine sahip süper çözünürlüklü bir spektrogramla temsil edilmiştir. Spektrogram görüntüsündeki tekrarlanan bölgeleri tespit etmek için, tüm spektrogram görüntüsünden AKAZE anahtar noktaları çıkarılmıştır. AKAZE anahtar noktalarına ait özellik tanımlayıcıların g2NN yaklaşımı ile eşleştirilmesi sonrası sesteki tekrarlanan segmentler görüntü üzerinde bulunmuştur. Eşleşen anahtar noktaların konumlarının ortalamalarından faydalanılarak ses dosyasındaki sahte segmentlerin tespiti gerçekleştirilmiştir. Deneysel analizler, halka açık veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin sahte sese uygulanan atak senaryolarında dahi en başarılı tespit yaklaşımı olduğunu göstermektedir.

Özellikle sahte seslerdeki sahtecilik izlerini gizlemek adına uygulanan ataklar göz önüne alındığında, ses kopyala-yapıştır sahteciliği daha yüksek doğrulukla tespit etmeye yönelik iyileştirmeler, gelecekteki çalışmalarımızın temelini oluşturmaktadır. Bu hedefe ulaşmak için atak bağımsız özellikler incelenecektir. Aynı zamanda probleme özel derin öğrenme tabanlı ağ yaklaşımları da değerlendirilecektir. Bunların sonucunda ses dosyalarına uygulanabilecek diğer yeni saldırı türleri de değerlendirilerek, geliştirilecek yöntemin bu saldırı türlerine karşı dayanıklı olunması sağlanacaktır.

KAYNAKLAR

Alcantarilla, P. F., Bartoli, A., & Davison, A. J. (2012). KAZE features. In *Computer Vision–ECCV 2012: 12th European Conference on Computer Vision, Florence, Italy, October 7-13, 2012, Proceedings, Part VI 12* (pp. 214-227). Springer Berlin Heidelberg.

Alcantarilla, P. F., Nuevo, J., & Bartoli, A. (2013). Fast explicit diffusion for accelerated features in nonlinear scale spaces british machine vision conference (BMVC).

Amerini, I., Ballan, L., Caldelli, R., Del Bimbo, A., & Serra, G. (2011). A sift-based forensic method for copy–move attack detection and transformation recovery. *IEEE transactions on information forensics and security*, 6(3), 1099-1110 DOI:10.1109/TIFS.2011.2129512

BURUCU, E. (2023). Adli Bilimlerde Ses Kayıtları Üzerinde Manipülasyon İncelemesi. *Hacettepe Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Dergisi*, 40(1) DOI:10.32600/huefd.1106795

Fischler, M. A., & Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395 DOI:10.1145/358669.358692

Huang, X., Liu, Z., Lu, W., Liu, H., & Xiang, S. (2020). Fast and effective copy-move detection of digital audio based on auto segment. In *Digital forensics and forensic Investigations: Breakthroughs in Research and Practice* (pp. 127-142). IGI Global DOI:10.4018/IJDCF.2019040104

Imran, M., Ali, Z., Bakhsh, S. T., & Akram, S. (2017). Blind detection of copy-move forgery in digital audio forensics. *IEEE Access*, 5, 12843-12855 DOI:10.1109/ACCESS.2017.2717842

Nam, J., Mysore, G. J., Ganseman, J., Lee, K., & Abel, J. S. (2010). A super-resolution spectrogram using coupled PLCA. In *Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association*.

Ustubioglu, B., Küçükuğurlu, B., & Ulutas, G. (2022). Robust copy-move detection in digital audio forensics based on pitch and modified discrete cosine transform. *Multimedia Tools and Applications*, 81(19), 27149-27185 DOI:10.1007/s11042-022-13035-3.

Ustubioglu, B., Tahaoglu, G., & Ulutas, G. (2023). Detection of audio copy-move-forgery with novel feature matching on Mel spectrogram. *Expert Systems with Applications*, 213, 118963 DOI:10.1016/j.eswa.2022.118963.

Wang, F., Li, C., & Tian, L. (2017, October). An algorithm of detecting audio copy-move forgery based on DCT and SVD. In *2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)* (pp. 1652-1657). IEEE.

Xiao, J. N., Jia, Y. Z., Fu, E. D., Huang, Z., Li, Y., & Shi, S. P. (2014). Audio authenticity: Duplicated audio segment detection in waveform audio file. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 19, 392-397 DOI:10.1007/s12204-014-1515-5.

Xie, Z., Lu, W., Liu, X., Xue, Y., & Yeung, Y. (2018). Copy-move detection of digital audio based on multi-feature decision. *Journal of information security and applications*, 43, 37-46 DOI:10.1016/j.jisa.2018.10.003

Yan, Q., Yang, R., & Huang, J. (2015, April). Copy-move detection of audio recording with pitch similarity. In 2015 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 1782-1786). IEEE.

Yan, Q., Yang, R., & Huang, J. (2019). Robust copy-move detection of speech recording using similarities of pitch and formant. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 14(9), 2331-2341 DOI:10.1109/TIFS.2019.2895965



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.08.2023
Kabul Tarihi : 05.10.2023

Received Date : 07.08.2023
Accepted Date : 05.10.2023

INVESTIGATING CUTTING FORCE AND CUTTING POWER WHEN TURNING AA6082-T4 ALLOY AT CUTTING DEPTHS SMALLER THAN TOOL NOSE RADIUS

AA6082-T4 ALAŞIMININ TAKIM BURUN YARIÇAPINDAN DAHA KÜÇÜK KESME DERİNLİKLERİNDE TORNALANMASINDA KESME KUVVETİ VE KESME GÜCÜNÜN ARAŞTIRILMASI

Kutay AYDIN¹ (ORCID: 0000-0003-3614-4877)

¹ Amasya University, Department of Mechanical Engineering, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kutay AYDIN, kutay.aydin@amasya.edu.tr

ABSTRACT

Aluminum alloys are widely preferred engineering materials in the manufacturing industry due to their high formability, good mechanical strength, and low density. Machining problems in aluminum alloys include built-up-edge formation, chip rupturing, and low surface quality, particularly in the 6xxx series due to the high Si content in the machining area. The aim of this study was to investigate the influence of cutting depth smaller than the tool corner radius, and various cutting parameters on cutting force and cutting power in machining AA6082-T4 alloy. In this context, the Johnson-Cook material model was established for AA6082-T4 alloy, and machining behaviors in terms of cutting force, and cutting power were investigated by performing finite element method (FEM) analyses using a full factorial design and variance analyses with different machining parameters. In conclusion, the lowest cutting forces were achieved with a cutting depth of 0.3 mm and a feed of 0.1 mm/rev, and the lowest cutting power was obtained with a cutting speed of 300 m/min, a cutting depth of 0.3 mm, and a feed of 0.1 mm/rev. In addition, the most effective machining parameters have been determined as cutting depth with a ratio of 91.74% for cutting force and cutting speed with a ratio of 33.13% for cutting power based on the results of variance and regression analysis.

Keywords: Turning, AA6082-T4, finite element method, cutting forces, cutting power, corner radius

ÖZET

Alüminyum alaşımlar, düşük özgül ağırlık, iyi mekanik dayanım, yüksek şekillenebilme kabiliyeti vb. özelliklere sahip olmaları sebebiyle endüstride çok tercih edilen mühendislik malzemeleri arasındadır. Alüminyum alaşımların genelinde yığıntı talaş oluşumu ve 6xxx serisi için ise Si içeriği sebebiyle talaş kaldırma bölgesinde yırtılma ve kötü yüzey kalitesi problemleri, işleme sorunları olarak bilinmektedir. Bu çalışmada, AA6082-T4 alaşım için takım uç yarıçapından daha küçük kesme derinlikleri ve farklı işleme parametrelerinin kesme kuvveti ve kesme gücü üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Bu kapsamda, AA6082-T4 alaşım için Johnson-Cook malzeme modeli kurulmuş ve farklı işleme parametreleri ile tam faktöriyel olarak sonlu eleman metodu (FEM) ve varyans analizleri yapılarak kesme kuvveti ve kesme gücü açılarından işleme davranışları incelenmiştir. Sonuç olarak; 0,3 mm kesme derinliği ve 0,1 mm/dev ilerleme miktarında en düşük kesme kuvvetleri, 300 m/dk kesme hızı, 0,3 mm kesme derinliği ve 0,1 mm/dev ilerleme miktarında ise en düşük kesme gücü elde edilmiştir. Buna ek olarak en etkili işleme parametrelerinin, kesme kuvveti için %91,74 oranla kesme derinliği ve kesme gücü için %33,13 oranla kesme hızı olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tornalama, AA6082-T4, sonlu eleman metodu, kesme kuvvetleri, kesme gücü, uç yarıçapı

INTRODUCTION

Aluminum alloys are among the most preferred engineering materials in many industries such as aviation, automotive, electronics, manufacturing, etc., owing to their lightweight, high durability, and high resistance to oxidation (Torić et al., 2017; Mazzolani, 1994). In addition, 6xxx series aluminum alloys are used as a structural alloy by being accepted as an alternative to traditional structural steels due to their high strength at normal temperatures (Eurocode, 2007; Spigarelli, Evangelista, and McQueen, 2003). Although the machinability of aluminum alloys heat treated with tempering, surface hardening, etc. increases, negative properties such as rapid crack propagation and tearing in the chip removal zone adversely affect the machinability of silicon-containing alloys such as the 6xxx series (Yağmur, Kaya, and Şeker, 2021). Poor surface quality problems caused by built-up-edge formation in aluminum alloys are also known. Choosing a cutting depth smaller than the tool corner radius to improve the surface quality is a technique used in turning and micro-turning operations (Hasçelik and Aslantaş, 2021). Few studies have been found in the literature on the machining of AA6082-T4 alloy and its analysis by the finite element method. Yağmur et al. examined the effect of chip breaker forms on surface quality and cutting forces by processing AA6082-T4 alloy with polycrystalline diamond (PCD) insert. They measured the lowest cutting forces with inserts having a chip breaker. They obtained the best surface quality with the inserts without chip breaker and achieved more advantageous results as the cutting depth decreased in the inserts with chip breaker (Yağmur et al., 2021; Yağmur, Kaya, and Şeker, 2019). Stanojkovic and Radovanovic made a selection of end mills using the multiple criteria decision approach in the milling of AA6082-T4 alloy. The choice of cutting tool was made based on factors such as the number of cutting edges, cutting speed, feed rate, and cost criteria (Stanojković and Radovanović, 2017). Campatelli and Scippa studied the effect of different cutting parameters on cutting forces during milling of AA6082-T4 alloy and created a prediction model (Campatelli and Scippa, 2012). Borvik et al., using AA6082-T4 target plates, examined the effect of different tilt angles on the ballistic impact effect with experimental and FEM analyses. In terms of validating the FEM analyses with experimental findings, they obtained compatible results with APM2 type bullets, while lower validation rates were obtained with soft spherical core bullets (Børvik, Olovsson, Dey, and Langseth, 2011). El-Danaf et al. studied the hot forming ability of AA6082-T4 alloy. In this context, as a result of their experiments at various temperatures and strain rates, they observed that the ductility improved at high temperature and medium-speed strain rate conditions (El-Danaf, AlMajid, and Soliman, 2008). In the literature, it is seen that statistical and numerical analyses are widely used in addition to conventional experimental studies. Thanks to these methods, a significant saving in time and cost is obtained. In addition, these methods validate and support experimental studies and play a major role in determining solution sensitivity, effective parameters, and positive and negative factors on the problem (Shetty, Kumar, Mallagi, and Keni, 2021; Bolar, Das, and Joshi, 2018; Yılmaz, Dilipak, Sarıkaya, Yılmaz, and Özdemir, 2014). In many studies, analysis of variance (ANOVA), finite element method (FEM), linear and multiple regression models, Taguchi, ANN (artificial neural networks) and RSM (response surface method) methods were preferred (Yadav, 2021; Çiftçi and Gökçe, 2019; Davoudinejad, Doagou-Rad, and Tosello, 2018; Hazir, Erdinler, and Koc, 2018; Kumar, 2018; Chandrasekaran and Payton, 2013).

In this study, the effects of cutting depth smaller than the tool corner radius, and different machining parameters on cutting force and cutting power when turning AA6082-T4 alloy with PCD inserts were studied numerically. Regarding this matter, experimental data in a similar early study (Yağmur et al., 2021) were used to validate FEM analysis. Then, by selecting different tool geometry and machining parameters, FEM simulations, variance and regression analyses were made, and machining behaviors were examined in terms of cutting force and cutting power. Furthermore, a Johnson-Cook constitutive model was developed for AA6082-T4 alloy, which can be used in future machining studies.

METHODOLOGY

In the study, AA6082-T4 alloy was used as work material. Material composition of work material is given in Table 1, and its mechanical and physical properties are demonstrated in Table 2. The CCGW 09 T312 ISO coded insert without chip breaker from the tool manufacturer Diamond Tooling Systems (DTS) was used as a cutting tool. The material for the cutting tool was selected as polycrystalline diamond (PCD).

Machining parameters were referenced from the tool manufacturer's recommended range of cutting conditions for aluminum alloys (DTS). In the analysis, an insert with a tool corner radius of 1.2 mm was used and three independent factors (cutting depth, cutting speed and feed) with different levels were determined. The cutting depth levels were created with 25%, 50%, and 75% of the tool corner radius. The independent factors and levels for both cutting tools

are shown in Table 3. Tool rake angles, tool holder and positioning were kept constant for all machining conditions (Fig. 1).

Table 1. Material Composition of AA6082-T4 Alloy

% weight	Base	Si	Mg	Mn	Fe	Zn	Cr
AA6082-T4	Al	0.95	0.75	0.5	0.5	0.1	0.1

Table 2. Mechanical and Physical Properties of AA6082-T4 Alloy

Property	Value
Thermal conductivity (W/mK)	160
Specific heat (J/kgK)	900
Coefficient of thermal expansion (1/°C)	2.3E-5
Density (kg/m ³)	2700
Young's modulus (GPa)	70
Poisson ratio	0.33
Tensile strength (MPa)	260
Hardness (Brinell)	70

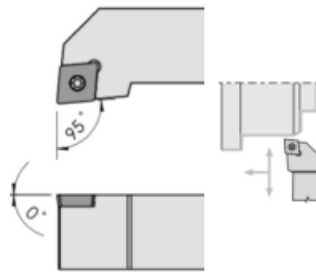


Figure 1. Tool Holder and Positioning

Although it is achievable to determine best machining conditions with cutting force data, variance and regression analyses were performed to obtain more detailed data. Minitab® R19 software was used for statistical analysis. Statistical analyses were performed using a full factorial design with selected control factors and levels (Table 3). Percent contributions and significance of each independent control factor and levels on the responses were obtained by analysis of variance. With the regression analysis, the empirical equation of the statistical model was established.

Table 3. Control Factors, Levels and Responses

Factors	Cutting Depth, a_p (mm)	Cutting speed, v (m/min)	Feed, f (mm/rev)
Level 1	0.3	300	0.1
Level 2	0.6	600	0.2
Level 3	0.9	900	
Responses		Cutting forces (N)	Cutting power (W)

Finite Element Method (FEM)

The finite element analyses were conducted using Third Wave AdvantEdge™ FEM software which was specialized for machining simulations. Updated-Lagrangian approach and adaptive remeshing technique were used in the simulations (Uğur, Kazan, and Özlü, 2022). The mesh structure of work material and cutting tool are formed with 4 nodes and 12 degrees of freedom elements. In numerical solutions in machining, deformation formation owing to temperature change and high stress and strain rate occur on the work material (Uğur, 2022; Ozlu and Ugur, 2021). In order to describe the stress-strain behavior of work material with high accuracy, material models based on hardening, strain rate and temperature change should be used (Gurusamy and Sriram, 2022; Rao, Dandekar, and Shin, 2011). For this reason, the Johnson-Cook constitutive model was used to describe the mechanical behavior of AA6082-T4 alloy. The Johnson-Cook constitutive model is expressed in Eq 1.

$$\sigma = \underbrace{[A + B\varepsilon^n]}_{\text{Elasto-Plastic}} \underbrace{\left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)\right]}_{\text{Viscosity}} \underbrace{\left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m\right]}_{\text{Thermal Softening}} \quad (1)$$

Here; σ is flow stress, ε is plastic strain, $\dot{\varepsilon}$ is strain rate, and $\dot{\varepsilon}_0$ is reference strain rate. T is temperature, T_{melt} is melting point of the AA6082-T4 alloy, and T_{room} is room temperature. The constants of work material: A , B , C , n and m are initial yield stress, hardening modulus (coefficient of strain hardening), strain rate dependency coefficient, work hardening exponent, and coefficient of thermal softening, respectively. Since there are very limited studies on FEM analysis with AA6082-T4 alloy in the literature, some of the Johnson-Cook material model parameters were obtained from AA6082-T6 alloy and some by calculation. The m and C coefficients were used from the study of Jaspers and Dautzenberg (2002) with AA6082-T6 alloy. The n and $\dot{\varepsilon}_0$ coefficients were taken as reference from the study of Børvik et al. (2011) with AA6082-T4 alloy. The hardening modulus was calculated with the Hollomon equation. The ε_p plastic strain ratio required for the calculation was obtained as 0.0383 from the study of Karahan et al. (2017). The Hollomon equation, which expresses the power law relationship between plastic strain ratio and stress, is expressed in Eq. 2. The Johnson-Cook material model parameters are given in Table 4.

$$\sigma = K \varepsilon_p^n \quad (2)$$

Table 4. Johnson-Cook Parameters used for AA6082-T4 Alloy

Parameter	A (MPa)	B (MPa)	n	T_{melt} (°C)	T_{room} (°C)	m	C	$\dot{\varepsilon}_0$ (1/s)
Value	170	545.2	0.227	620	20	1.31	0.00747	5.0E-4

Third Wave AdvantEdge™ software uses the Coulomb friction model which is expressed in Equation 3. In the equation, the frictional force, friction coefficient and the normal force are F_f , μ , and F_n , respectively. In FEM analysis, the friction coefficient between aluminum alloys and PCD material was determined as 0.27 from early studies (Davim et al., 2010; Davim, Maranhao, Jackson, Cabral, and Gracio, 2008).

$$F_f = \mu F_n \quad (3)$$

In FEM analysis, mesh structure is an important factor affecting the accuracy of the analysis, as well as the definition of the work material and the friction model. In machining simulations, it is critical that the minimum mesh element size is at least half the feed. In addition, very small minimum mesh size increases the simulation time (AdvantEdge, 2015). The cutting tool, work material and other mesh parameters are shown in Table 5. The rigid tool moves were defined horizontally on the positive Y-axis as feed. The elasto-plastic work material was fixed at zero velocity on the X-Y-Z axes. The work material was only moved rotationally counterclockwise on the Y-axis as cutting speed. In Fig. 2, all boundary conditions and the mesh structure of the finite element model are presented.

Validation of FEM Analyzes

Validation and verification of FEM analyzes were achieved with experimental findings referenced from early study including the machining of AA6082-T4 alloy with cutting tools of similar geometric design (Yağmur et al., 2021). For verification; cutting force measurements (Table 7) obtained with cutting parameters of 0.8 mm tool corner radius, 0.26 mm cutting depth, 0.14 mm/rev feed, and 400 m/min cutting speed were compared with FEM analyses to verify the FEM model and select appropriate mesh parameters. FEM analyses were performed for the experimental force measurement by selecting different mesh parameters (Table 6). In Table 6, error percentages and relative difference percentages were calculated to compare the FEM cutting force with the experimental cutting force. The error values represent the error between the FEM cutting force and the experimental cutting force in percentage. The relative difference values express in percentage terms how much the FEM cutting force differs compared to the FEM cutting force in the previous row. When the relative difference is small enough, it indicates that a fine enough mesh structure has been reached. The error percentage increases when lower-precision elements are created during mesh regeneration. Furthermore, the error percentage increases significantly when the minimum element size of the work material and cutting tool are increased.

Table 5. Mesh Structure Parameters

Initial cutting tool mesh	Value
Element size (max)	0.3 mm
Element size (min)	0.03 mm
Grading of mesh	0.5
Safety of curvature	1.5
Segments per edge	0.5
Min. element edge length	0.0002 mm
Initial work material mesh	
Work material diameter	6 mm
Work material length	3 mm
Element size (max)	3 mm
Element size (min)	0.05 mm
Grading of mesh	0.5
Safety of curvature	2.5
Segments per edge	2.5
Chip bulk	0.07475 mm
Cutter edge	0.05717 mm
Adaptive mesh refinement	
Refinement factor of mesh	20 (max-fine)
Coarsening factor of mesh	1 (max-fine)
Refinement factor of chip	3 (max-refine)
Grading near cutting edge	6
Factor of grading radius	4

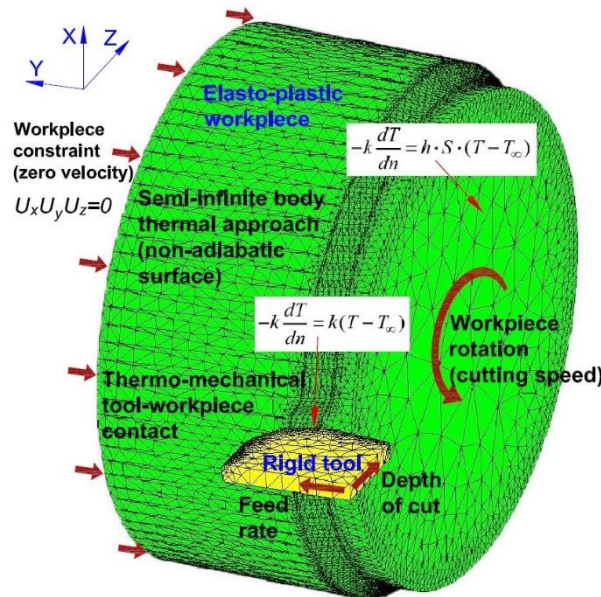


Figure 2. Boundary Conditions and Mesh of the Finite Element Model

By selecting the parameters of 0.03 mm for the minimum element size of the work material, 0.05 mm for the minimum element size of the cutting tool, refinement factor of mesh of 20 (20 max. fine 1 max coarse), and coarsening factor of mesh of 1 (1 max. fine - 20 max. coarse), the lowest error percentage of 8.82% and a small relative difference percentage were obtained. Therefore, FEM analyses were conducted with these mesh parameters. For validation; cutting force measurements in some machining parameters in early study (Yağmur et al., 2021) and cutting force measurements obtained from FEM analyzes were compared. These comparison data is shown in Table 7. In the “Validation ratio” column, the ratios of the cutting forces obtained from the experimental and FEM analyzes to each other are expressed as percentages. In all FEM analyses, validation ratios of over 90% were obtained. According to early studies, it was determined that the validation ratios obtained were consistent and adequate (Gao, Wu, Zhang, and Luo, 2013; Mamedov and Lazoglu, 2013; Dandekar, Shin, and Barnes, 2010).

Table 6. Verification of FEM Model

Work material min element size (mm)	Cutting tool min element size (mm)	Refinement factor of mesh	Coarsening factor of mesh	Cutting force FEM (N)	Cutting force Experimental (Yağmur et al., 2021) (N)	Error (%)	Relative difference (%)
10	0.05	20	1	149.28	77.96	47.78	-
5	0.05	20	1	137.14	77.96	43.15	8.85
3	0.05	20	1	126.33	77.96	38.29	8.56
0.03	0.3	20	1	115.49	77.96	32.50	9.39
0.03	0.1	20	1	102.63	77.96	24.04	12.53
1	0.05	20	1	90.21	77.96	13.58	13.77
0.03	0.05	20	10	89.18	77.96	12.58	1.15
0.5	0.05	20	1	88.85	77.96	12.26	0.37
0.1	0.05	20	1	87.73	77.96	11.14	1.28
0.03	0.05	10	1	87.49	77.96	10.89	0.27
0.03	0.05	20	1	85.50	77.96	8.82	2.33

Table 7. Validation of FEM Analyzes

Tool corner radius (mm)	Depth of Cut, ap (mm)	Feed, f (mm/rev)	Cutting Speed, v (m/min)	Cutting force Experimental (Yağmur et al., 2021) (N)	Cutting force FEM (N)	Validation ratio (%)
0.4	0.26	0.14	200	82.40	74.84	90.83
			400	65.56	71.94	91.13
0.8	0.26	0.14	200	96.61	90.62	93.80
			400	77.96	85.50	91.18

RESULTS AND DISCUSSION

According to FEM analysis, variations of cutting force are given in Figure 3, and variations of cutting power are shown in Fig. 4 for all cutting depths and all machining parameters. When Figures 3 and 4 are examined, it has been observed that as the feed increased for all cutting depths, the cutting forces and cutting power also increased. This phenomenon is a result of the rise in cutting zone area as the feed increases (Gürbüz, Kafkas, and Şeker, 2012). During machining, an increase in cutting speed results in higher cutting zone temperatures, a reduction in the coefficient of friction, a decrease in the shear strength of the material in the second deformation zone, and a smaller tool-chip contact area. For these reasons, a decrease in cutting forces is an expected result in machining operations (Gürbüz, Şeker, and Kafkas, 2020; Ciftci, 2006; Zhao, Ai, and Li, 2006). However, upon examining Fig. 3, it is evident that the effect of increasing cutting speed on cutting forces was not significant. It is believed that the increase in cutting speed led to a rise in contact length, which in turn increased the cutting forces. For further clarification on this case, Figure 5 displays the impact of changes in cutting speed on the cutting zone temperature, pressure, and Von Mises stresses while maintaining the same cutting parameters. When Figure 5 is examined, it is understood that the cutting zone temperatures at 900m/min cutting speed were higher than that at 300m/min. Similarly, the cutting zone pressure and Von Mises stress increased at 900m/min cutting speed. For these reasons, it can be justified that increase in temperature reduced the shear strength, and the increase in contact length raised the cutting force. When Figure 4 is examined, it is seen that the cutting power raised significantly with the increase in cutting speed. This rise in cutting power may explain the unexpected behavior in cutting forces. The lowest cutting forces were obtained at cutting depth of 0.3 mm and feed of 0.1 mm/rev in all machining parameters (Fig. 3). The lowest power consumption was obtained with 300 m/min cutting speed at cutting depth of 0.3 mm and feed of 0.1 mm/rev (Fig. 4).

Variance and regression analysis were made by assuming that the cutting forces and cutting power findings obtained from FEM analyses vary according to independent control factors (cutting depth, cutting speed and feed). P values in statistical analyses were generally less than 5% ($P < 0.05$). A value of 0.549 was obtained only for the cutting speed factor in the cutting force analysis (Table 8). This is thought to be caused by the effect of the inconsistency between cutting speed and contact length on the cutting force (Fig. 3 and 4). Low P values obtained from other independent control factors indicate that the control factor and level selection are statistically significant (Bolar et al., 2018; Yılmaz et al., 2014). When Table 8 is examined, it is seen that the most effective control factor on the cutting force

was the cutting depth with a percent contribution of 91.74%, and the most effective control factor on the cutting power was the cutting speed with a percent contribution of 33.13%.

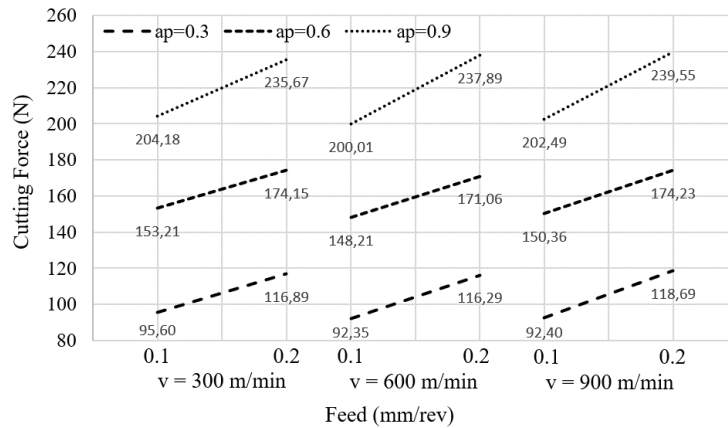


Figure 3. Cutting Force Variations at Different Machining Conditions based on the Cutting Depth

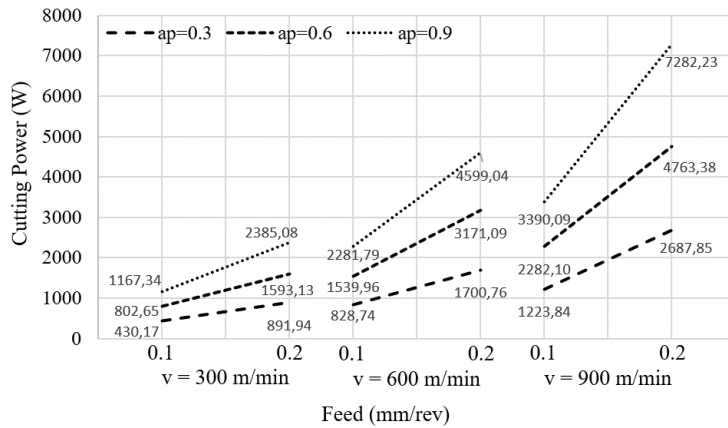


Figure 4. Cutting Power Variations at Different Machining Conditions based on the Cutting Depth

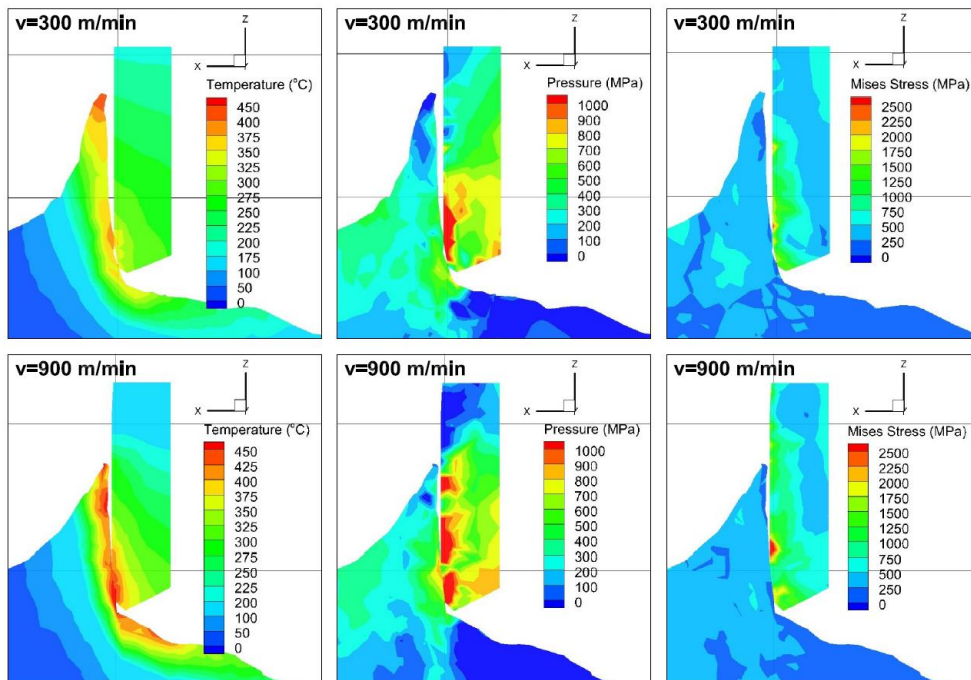


Figure 5. Cutting Temperature, Pressure and Von Mises Stress Distributions at $a_p=0.3$ mm and $f=0.2$ mm/rev Machining Parameters depending on Cutting Speed

Table 8. ANOVA Results

Source	DF	Adj-SS	Adj-MS	F-value	P-value	Contribution (%)
<i>Cutting force (N)</i>						
<i>Linear model</i>	5	42769	8553.8	574.09	0.000	99.58
<i>Cutting depth, ap</i>	2	39398.6	19699.3	1322.12	0.000	91.74
<i>Cutting speed, v</i>	2	18.8	9.4	0.63	0.549	0.04
<i>Feed, f</i>	1	3351.6	3351.6	224.94	0.000	7.80
<i>Error</i>	12	178.8	14.9			0.42
<i>Total</i>	17	42947.8				100.00
<i>Cutting power (W)</i>						
<i>Linear model</i>	5	44751617	8950323	15.03	0.000	86.23
<i>Cutting depth, ap</i>	2	14843502	7421751	12.46	0.001	28.60
<i>Cutting speed, v</i>	2	17194164	8597082	14.43	0.001	33.13
<i>Feed, f</i>	1	12713951	12713951	21.35	0.001	24.50
<i>Error</i>	12	7147223	595602			13.77
<i>Total</i>	17	51898841				100.00

In order to see the behaviors of the responses as a result of the variation of machining parameters (control factors) more clearly, the impact graphs are given in Figure 6 and Figure 7. In the graphs, cutting force, cutting power values, and their standard errors are given for each level of each independent control factor. The impact plots were created by calculating the average of the dependent variables (Y-axis) obtained by using whichever control factor (X-axis) effect is desired to be shown. For example, to show the effect of the cutting depth factor on the cutting force, the cutting force values obtained by using for example a cutting depth of 0.3 mm are gathered, the average of these force values is calculated and then marked on the graph for this cutting depth, and all the graphs are generated continuing in this way. When Figure 6 is examined, it is seen that the cutting force raised with the increased cutting depth and feed. It is understood that the cutting speed parameter did not have a significant effect on the cutting force as discussed earlier (Figure 3). When Figure 7 is examined, it is observed that the cutting power raised with the increase in cutting depth, cutting speed, and feed. When the standard errors are examined, it is obtained that all levels of the cutting speed factor had coincident domains in terms of cutting force (Figure 6). It is understood that there were independent domains of influence in terms of cutting force and cutting power for all levels of other factors (Figures 6 and 7).

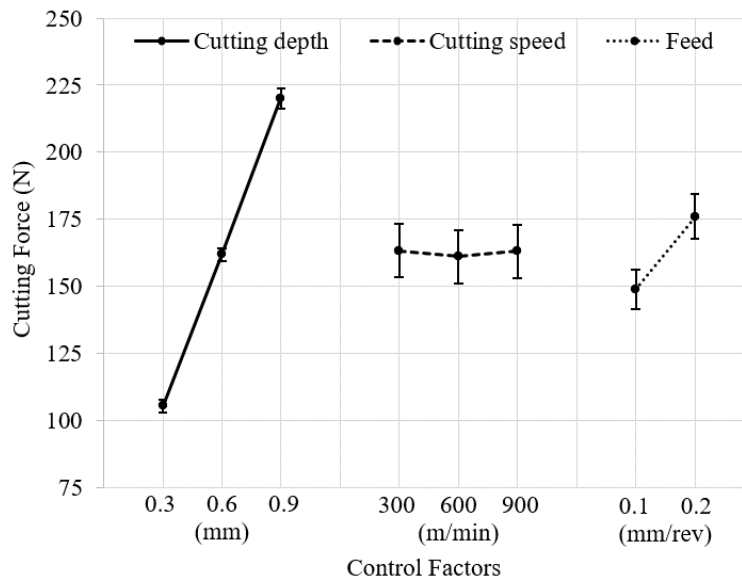


Figure 6. Impact Graphs depending on the Cutting Force

The model summary obtained by regression analyzes is given in Table 9. The coefficients of determination (R^2) of the statistical model were found to be 99.53% for cutting force and 86.19% for cutting power. These ratios indicate that the statistical models established with the FEM analyses are compatible and the results are consistent. The regression equations are shown in Eq. 4 for cutting force and Eq. 5 for cutting power.

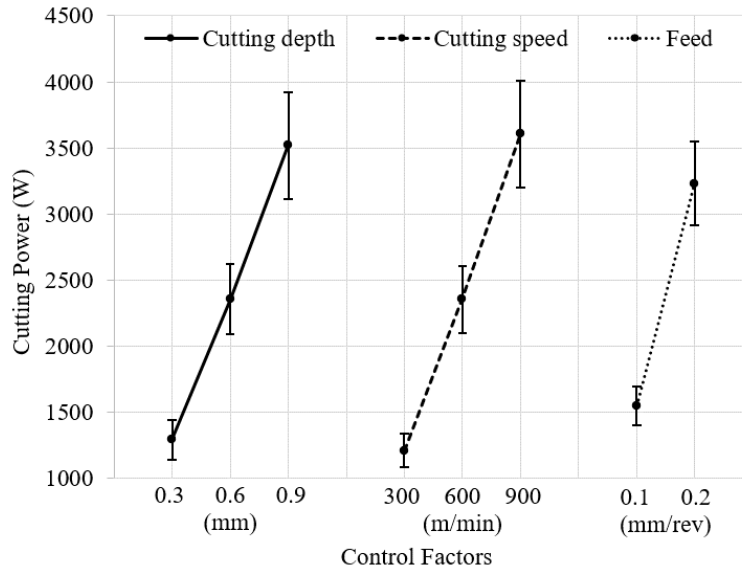


Figure 7. Impact Graphs depending on the Cutting Power

Table 9. Summary of Statistical Models

S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
<i>Cutting force</i>			
3.778	99.53%	99.44%	99.23%
<i>Cutting power</i>			
715.545	86.19%	82.23%	74.44%

$$\text{Cutting force} = 7.20 + (57.30 \times ap) - (0.16 \times v) + (27.29 \times f) \quad (4)$$

$$\text{Cutting power} = -4748 + (1112 \times ap) + (1197 \times v) + (1681 \times f) \quad (5)$$

CONCLUSION

In this study, machining behaviors of AA6082-T4 alloy in terms of cutting forces and cutting power using cutting depth smaller than the tool corner radius and different machining parameters were investigated when performing a turning operation with PCD insert. In this context, FEM analyses followed by variance and regression analyses were performed by choosing different cutting depths, cutting speeds, and feeds. The conclusions drawn from the findings are presented below:

- In terms of cutting force; it was understood that the cutting forces were reduced at smaller cutting depths and lower feeds. The lowest cutting forces were obtained at cutting depth of 0.3 mm and feed of 0.1 mm/rev.
- It was observed that the cutting forces remained largely unchanged despite variations in the cutting speed. It is thought that this situation is caused by a compensation phenomenon in which the increasing chip length conceals the effect of decreasing shear strength in the flow zone at higher cutting speeds.
- In terms of cutting power; it was concluded that power consumption reduced with decreasing cutting depth, cutting speed, and feed. The lowest cutting power was obtained at cutting speed of 300 m/min, cutting depth of 0.3 mm, and feed of 0.1 mm/rev.
- In terms of variance and regression analysis; it was concluded that the most effective machining parameters were the cutting depth with a ratio of 91.74% for the cutting force and the cutting speed with a ratio of 33.13% for the cutting power. As a result of obtaining the coefficients of determination of the statistical model as 99.53% for the cutting force and 86.19% for cutting power, it was understood that statistical models were able to describe the variance in cutting force and cutting power values calculated by FEM analyses.
- As a result of validating the FEM analyses with the experimental measurements in the literature with a rate of over 90%, an acceptable the Johnson-Cook material model for AA6082-T4 aluminum alloy for future studies was created.

As a result, the effects of different machining conditions on the cutting force and cutting power were determined for machining operations where the cutting depth is preferred smaller than the tool corner radius in order to achieve high surface quality in the machining of AA6082-T4 alloy. In addition, the Johnson-Cook material model of AA6082-T4 alloy has been added to the literature especially for use in machining operations.

REFERENCES

- AdvantEdge. (2015). *AdvantEdge 7.1 User's Manual*. Minneapolis, USA: Third Wave Systems.
- Bolar, G., Das, A., & Joshi, S. N. (2018). Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. *Measurement*, 121, 190-204.
- Børvik, T., Olovsson, L., Dey, S., & Langseth, M. (2011). Normal and oblique impact of small arms bullets on AA6082-T4 aluminium protective plates. *International Journal of Impact Engineering*, 38(7), 577-589.
- Campatelli, G., & Scippa, A. (2012). Prediction of milling cutting force coefficients for Aluminum 6082-T4. *Procedia CirP*, 1, 563-568.
- Chandrasekaran, V. V., & Payton, L. N. (15-21 November 2013). *Comparison orthogonal tube turning data versus finite element simulation using LS Dyna*. Paper presented at the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, California, USA.
- Ciftci, I. (2006). Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools. *Tribology International*, 39(6), 565-569. doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.05.005>
- Çiftçi, İ., & Gökçe, H. (2019). Molibden alaşımlarının işlenmesinde kesici takım ve kesme parametrelerinin Taguchi Metodu ile optimizasyonu. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(1).
- Dandekar, C. R., Shin, Y. C., & Barnes, J. (2010). Machinability improvement of titanium alloy (Ti-6Al-4V) via LAM and hybrid machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(2), 174-182.
- Davim, J. P., Maranhao, C., Jackson, M., Cabral, G., & Gracio, J. (2008). FEM analysis in high speed machining of aluminium alloy (Al7075-0) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K10) cutting tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(11-12), 1093-1100.
- Davim, J. P., Reis, P., Maranhao, C., Jackson, M., Cabral, G., & Gracio, J. (2010). Finite element simulation and experimental analysis of orthogonal cutting of an aluminium alloy using polycrystalline diamond tools. *International Journal of Materials and Product Technology*, 37(1-2), 46-59.
- Davoudinejad, A., Doagou-Rad, S., & Tosello, G. (2018). A finite element modeling prediction in high precision milling process of aluminum 6082-T6. *Nanomanufacturing and Metrology*, 1(4), 236-247.
- DTS. Diamond Indexable Inserts. Retrieved from https://en.diamond-toolingsystems.com/wp-content/uploads/2021/11/01_Diamond-Inserts-Catalog_DTSGmbH.pdf
- El-Danaf, E. A., AlMajid, A. A., & Soliman, M. S. (2008). Hot deformation of AA6082-T4 aluminum alloy. *Journal of materials science*, 43(18), 6324-6330.
- Eurocode. (2007). 9: Design of Aluminium Structures-Part 1-1: General Structural Rules. European Committee for Standardization. In Brussels, Belgium: CEN, EN 1999-1-1: 2007.
- Gao, G., Wu, B., Zhang, D., & Luo, M. (2013). Mechanistic identification of cutting force coefficients in bull-nose milling process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(3), 823-830.
- Gurusamy, M., & Sriram, S. (2022). Investigations on the Choice of Johnson-Cook Constitutive Model Parameters for the Orthogonal Cutting Simulation of Inconel 718. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 1-25.
- Gürbüz, H., Kafkas, F., & Şeker, U. (2012). AISI 316L eçeliğinin işlenmesinde kesici takım kesici kenar formu ve talaş kırıcı formlarının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 1(2), 173-184.
- Gürbüz, H., Şeker, U., & Kafkas, F. (2020). Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L stainless steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 225-240. doi:<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.454386>

- Hasçelik, A., & Aslantaş, K. (2021). Mikro Tornalama İşleminde Kesici Takım Burun Yarıçapının Kesme Kuvvetlerine Etkisi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 2(1), 13-25.
- Hazir, E., Erdinler, E. S., & Koc, K. H. (2018). Optimization of CNC cutting parameters using design of experiment (DOE) and desirability function. *Journal of Forestry Research*, 29(5), 1423-1434.
- Jaspers, S., & Dautzenberg, J. (2002). Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(2-3), 322-330.
- Karahan, B., İnce, U., Yurtdaş, S., Kılınçdemir, N. E., Ağarar, F. C., & Kılıçaslan, C. (29-30 September 2017). *On the Cold Forging of 6082 H13 and T4 Aluminum Alloy Bushes*. Paper presented at the 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku, Azerbaijan.
- Kumar, S. L. (2018). Experimental investigations and empirical modeling for optimization of surface roughness and machining time parameters in micro end milling using Genetic Algorithm. *Measurement*, 124, 386-394.
- Mamedov, A., & Lazoglu, I. (2013). Machining forces and tool deflections in micro milling. *Procedia CirP*, 8, 147-151.
- Mazzolani, F. (1994). *Aluminium alloy structures*. London, UK: CRC Press.
- Ozlu, B., & Ugur, L. (2021). Optimization of cutting forces on turning of Ti-6Al-4V Alloy by 3D FEM simulation analysis. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 10(2), 1789-1795.
- Rao, B., Dandekar, C. R., & Shin, Y. C. (2011). An experimental and numerical study on the face milling of Ti-6Al-4V alloy: Tool performance and surface integrity. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 294-304.
- Shetty, R., Kumar, S., Mallagi, R., & Keni, L. (2021). L 1 6 Orthogonal Array-Based Three-Dimensional Finite Element Modeling for Cutting Force and Chip Formation Analysis During Dry Machining of Ti-6Al-4V. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 20(01), 123-134.
- Spigarelli, S., Evangelista, E., & McQueen, H. (2003). Study of hot workability of a heat treated AA6082 aluminum alloy. *Scripta Materialia*, 49(2), 179-183.
- Stanojković, J., & Radovanović, M. (2017). Selection of solid carbide end mill for machining aluminum 6082-T4 using mcdm method. *University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series D*, 79(1), 175-184.
- Torić, N., Brnić, J., Boko, I., Brčić, M., Burgess, I. W., & Uzelac, I. (2017). Experimental analysis of the behaviour of aluminium alloy EN 6082AW T6 at high temperature. *Metals*, 7(4), 126.
- Uğur, L. (2022). A Numerical and Statistical Approach of Drilling Performance on Machining of Ti-6Al-4V Alloy. *Surface Review and Letters*, 29(12), 2250168-2250137.
- Uğur, L., Kazan, H., & Özlü, B. (2022). Investigation of the Impacts of Cutting Parameters on Power Usage in Cryogenic-Assisted Turning of AISI 52100 Bearing Steel by FEM. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 3(3), 55-61.
- Yadav, R. N. (2021). Statistical and Intelligent Techniques for Modeling and Optimization of Duplex Turning for Aerospace Material. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 20(02), 341-367.
- Yağmur, S., Kaya, M., & Şeker, U. (7-9 Kasım 2019). *PCD Takımlarda Farklı Talaş Kırıcı Formlarının AA6082 T4 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi*. Paper presented at the 10th International Congress on Machining, Antalya, Turkey.
- Yağmur, S., Kaya, M. K., & Şeker, U. (2021). AA-6082 T4 Alaşımının Tornalamasında Çok Kristalli Elmas (ÇKE) Takımlara Uygulanan Talaş Kırıcı Formlarının Kesme Kuvvetleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 51-57.
- Yılmaz, V., Dilipak, H., Sarıkaya, M., Yılmaz, C. Y., & Özdemir, M. (2014). Frezeleme işlemlerinde kesme kuvveti, titreşim ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının modellenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 30(4), 220-226.
- Zhao, J., Ai, X., & Li, Z. L. (2006). *Finite element analysis of cutting forces in high speed machining*. Paper presented at the Materials Science Forum, Switzerland.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.08.2023
Kabul Tarihi : 06.09.2023

Received Date : 07.08.2023
Accepted Date : 06.09.2023

KAPASİTELİ TEK ATAMALI YEŞİL ANADAĞITIM ÜSSÜ KAPSAMA AKIŞ PROBLEMİ

CAPACITATED SINGLE ALLOCATION GREEN HUB COVERING FLOW PROBLEM

Nazmi ŞENER¹ (ORCID: 0000-0002-4027-5143)

¹ Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazmi ŞENER, nazmi.sener@alanya.edu.tr

ÖZET

Yeşil tedarik zinciri uygulamalarına geçişin arkasında yükselen çevresel ve ekonomik endişeler bulunmaktadır. Düzenleyici kurumlar, karbon emisyonları ve gürültü kirliliği gibi unsurlara odaklanarak, taşımacılığın çevresel etkilerini hafifletmeyi amaçlamaktadırlar. Çalışmamız, ideal anadağıtım üssü konumlarını belirleyerek tek atamalı anadağıtım üssü kapsama akış problemiyle başa çıkan yenilikçi bir optimizasyon modeli sunmaktadır. Standart anadağıtım üssü problemlerinden farklı olarak, modelimiz anadağıtım üssü kapasite sınırlarını anlamaktadır. Bir kapasite maliyet fonksiyonunu sisteme entegre ederek, genel ağ emisyonlarını yönetirken kapasiteyi de yönlendirmektedir. Ayrıca, anadağıtım üssü kapasitelerinin kısıtlamaları gibi çeşitli parametrelerin, en iyi çözümleri nasıl dönüştürebileceğini de dikkate almaktadır. Geleneksel modelleri geride bırakmak için, endüstri ve geleneksel kaynaklardan elde edilen yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Ardından, önerilen model kapasite düşüncelerini göz ardı eden modellerle karşılaştırılmıştır. Bu bütüncül anlayış, önerilen modellerin daha iyi performans ve yeşil sonuçlar sağladığını göstermektedir. Özünde, çevresel korumayı lojistik optimizasyon ile birleştirerek, tedarik zinciri yönetiminde yeni başlayan çağa katkıda bulunulmuştur. Diğer modellerin göz ardı ettiği karbon salınım maliyeti düşüncesini dikkate alarak daha verimli ve çevre bilincine sahip bir lojistik ağı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yeşil anadağıtım üssü, tekli atama, kapsama

ABSTRACT

Driving the shift to green supply chain practices are rising environmental and economic concerns. Regulatory bodies aim to mitigate transportation's environmental repercussions, focusing on aspects such as carbon emissions and noise pollution. Our study introduces a revolutionary optimization model that handles a single allocation green hub covering flow problem by determining ideal hub locations. Distinct from standard hub issues, our model comprehends hub capacity limits. With a capacity cost function integrated into the system, it simultaneously manages overall network emissions while maneuvering the capacity. Additionally, this takes into account how various parameters, like the constraints of hub capacities, can transform optimal solutions. To outperform traditional models, we amalgamate a new dataset drawn from industry and conventional resources. Subsequently, we juxtapose our model with those foregoing capacity considerations. This holistic understanding displays how our model fosters enhanced performance and green outcomes. In essence, we are merging environmental preservation with logistics optimization, ushering a new era in supply chain management, taking into account the carbon emission cost considerations that most other models ignore, leading to a more efficient and environmentally conscious logistic network.

Keywords: Green hub, single allocation, covering

GİRİŞ

Günümüzde, tedarik zinciri yönetimi ve lojistikte çevresel sürdürülebilirlik ve karbon salınımının azaltılması önemli faktörler haline gelmektedir. Özellikle, taşımacılık faaliyetleri karbon salınımı ve gürültü kirliliği yoluyla çevre üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, taşımacılık otoriteleri bu olumsuz etkileri azaltmak için sıkı düzenlemeler getirmektedir.

Taşıma ağları tasarımındaki odak noktalardan biri, taşımacılık, telekomünikasyon ve lojistik gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılan merkez-çember sistemleridir. Bu tür sistemlerin en iyi bilinen örneklerinden biri anadağıtım üssü problemidir. Ağdaki anadağıtım üssü problemi, bir grup düğümün anadağıtım üssü olarak seçilmesini içerir. Bu anadağıtım üssü düğümleri birbirine bağlı olduğu varsayılırken, anadağıtım üssü olmayan düğümler tekli ya da çoklu atama kuralına göre anadağıtım üssüne bağlanır. Tekli atama ağında, her düğüm yalnızca bir anadağıtım üssüne bağlanırken, çoklu atama ağında her düğüm en az bir anadağıtım üssüne bağlanır. Bu tip ağ yapılandırması, her kaynak-hedef düğüm çifti arasında en az bir yol oluşturur ve tamamen bağlı bir ağdan daha az bağlantı kullanır.

Bu makale yalnızca tekli atama ağlarını ele alacak olsa da sunulan modeller çoklu atama ağları için kolayca genişletilebilir. Ağdaki anadağıtım üslerinin konumunu en iyileyerek, verimliliği artırabilir, maliyetleri azaltabilir ve genel performansı geliştirebilirsiniz. Bu tür analizler, kuruluşların kaynakları nasıl tahsis etmeleri, hizmet teslimatını nasıl iyileştirmeleri ve stratejik hedeflerine nasıl ulaşabilecekleri konusunda daha bilinçli kararlar vermelerine yardımcı olabilir. Ancak, geleneksel anadağıtım üssü modelleri taşımacılık faaliyetlerinin çevresel etkisini dikkate almaz.

Bu boşluğu doldurmak için, araştırmacılar çevreye duyarlı "yeşil" anadağıtım üssü kapsama akış problemleri kavramını tanıtmıştır. Bu problemler, lojistik ağda kaynak/hedef akışlarının atamasını optimize etmek ve karbon emisyonları ve diğer çevresel etkileri en aza indirmeyi amaçlar. Bu makalede, kapasitesiz (TAYAÜKAP) ve kapasiteli (KTAYAÜKAP) tek atamalı yeşil anadağıtım üssü kapsama akışı problemi incelenecektir. Bu problem, çevresel etki azaltma ile maliyet optimizasyonunu dengelemek için bir yol sunarak, daha sürdürülebilir bir taşıma ağ tasarımı benimseyen şirketler için özellikle önemlidir. Bu problemi çözerek, şirketler çevre ve operasyonlarını fayda sağlayacak daha sürdürülebilir bir taşıma ağ tasarımı elde edebilirler.

Bu çalışmanın öne çıkan yanlarını sıralayacak olursak,

- Son yıllarda artan çevreci eğilimlerle, karbon salınımının azaltılması için hükümetler tarafından uygulanan karbon salınım vergilendirmesi yaklaşımı tekli anadağıtım üssü kapsama akış problemine entegre edilmiştir,
- Tekli anadağıtım üssü kapsama akış problemine kapasite kavramı eklenerek gerçek hayat problemlerine daha yakın bir modelleme bakış açısı sağlanmıştır,
- İki farklı türdeki veri kümesi kullanılarak modelde ortaya atılan vergilendirmenin salınımına etkisi incelenmiştir.

Makalenin geri kalanının yapısı şu şekildedir: konuya ilişkin yazın taraması 2. Bölümde verilmiştir. Kısaltma gösterimler ve matematik modeller 3. Bölümde tanımlanmıştır. 4. Bölümde ise kullanılan veri kümeleri tanımlanmış ve bu kümeler kullanılarak elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. 5. Bölümde ise sonuçlar yorumlanmış ve geleceğe yönelik araştırma konuları tartışılmıştır.

YAZIN TARAMASI

Bu bölümde anadağıtım üssü kapsama problemleri ve bunun yeşil tipleri hakkındaki yazın taraması verilecektir. Anadağıtım Üssü Kapsama Problemi (ADKP), küme kapsama problemine (Sener, 2020) benzeyen ihmal edilmiş bir anadağıtım üssü konum problemleri tipidir. ADKP'nin amacı, tüm düğümleri kapsayan en az sayıda anadağıtım üssü açmaktır. Alumur Alev ve Yetis Kara (2009) ADKP'nin karmaşıklığının NP-Zor olduğunu kanıtlamışlardır. Campbell (1994), hem tek hem de çoklu tahsis sürümlerini keşfeden, ancak taşıma maliyetlerinin çalışmada ihmal edildiği ADKP'yi anlatan ilk çalışmayı önermiştir.

Yetis Kara ve Tansel (2003), tek atamalı ADKP için bir doğrusal karışık tamsayılı modelini önermişlerdir ve bu önerme ile Campbell (1994)'ın modelinin doğrusallaştırmasını sağlamışlardır. Yapılan hesaplama çalışmaları, modellerin doğrusallaştırılmış sürümlerinin, doğrusal olmayan modellere göre daha az bellek gerektirdiğini ve daha iyi çözüm kalitesi sunduğunu ortaya koymuştur. Tan ve Yetis Kara (2007), anadağıtım üslerindeki bekleme sürelerini

dikkate alan son varış ADKP'sini incelediler ve bu sorun için bir tam sayılı matematiksel programlama modeli geliştirmişler ve Türkiye'deki bir kargo operasyonuna uygulamışlardır.

Wagner (2008), hem tek hem de çoklu atama ADKP için önerilen modelleri iyileştirmiş ve modellere miktara bağımlı olmayan azalan akış sürelerini eklemiştir. Önceki modellere göre formülasyonlarının üstün olduğunu belirtmişlerdir. Alumur Alev ve Yetis Kara (2009), eksik ağ yapısı için yeni bir tek tahsis ADKP tanıtmış ve anadağıtım üsleri arasında bağlantıların oluşturulmasını dikkate almışlardır. Calik vd. (2009), eksik ağ yapısıyla bütünleşik tek atamalı ADKP için Tabu Arama sezgiselini geliştirmişlerdir.

Lowe ve Sim (2013), tek tahsis ADKP'deki taşıma maliyetlerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmaları, ADKP'ye taşıma maliyetlerini ilk kez dahil eden ve problemin toplam maliyetini azalttığını kanıtlayan ilk çalışmaydı. Karimia, Bashiri ve Nickel (2016), ilk kapasiteli tek tahsis p-ADKP'yi tanıttı ve ADKP üzerinde çoklu modlu ağların etkisini incelemişlerdir. Problemlerini bir karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle ettiler ve çözmek için Tabu Arama tabanlı bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sener ve Feyzioğlu (2021), ilk kapasiteli ve kapasitesiz çoklu tahsis ADKP'yi tanıttı ve çoklu tahsis ADKP üzerinde taşıma maliyetlerinin etkisini incelemişlerdir.

Yeşil anadağıtım üssü konum problemi üzerine yazarın bildiği kadarıyla yazında yalnız birkaç çalışmanın var olduğu görülmüştür. Mohammadi, Torabi ve Tavakkoli-Moghaddam (2014), çevresel sorunları dikkate alan ilk tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi çözümünü önermişlerdir. Önerilen çok hedefli rassal model, bağlantı ve anadağıtım üssü kapasite kısıtlamaları ile toplam taşıma maliyetlerini, toplam gürültü kirliliği maliyetlerini ve toplam enerji tüketimi maliyetlerini en aza indirmiştir. Sonuçları, enerji tüketimini en aza indirmenin sera gazı salınımlarını en aza indirmekle ilgili olduğunu göstermektedir.

Niknamfar ve Niaki (2016), bir zaman penceresi ile tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için çok hedefli bir en iyileme modeli geliştirmişlerdir. Özellikle, anadağıtım üssü kapasite kısıtlamaları ile birlikte holding şirketinin toplam karını ve taşıyıcı şirketlerin toplam karını en üst düzeye çıkarmayı amaçlamışlardır. Ayrıca, araç hızının bir fonksiyonu olarak araç salınımlarını da dikkate almışlar. Elde edilen problem formülasyonu, en kötü performans gösteren amaç fonksiyonunu en üst düzeye çıkararak çözmüşler.

Dukkanci, Peker ve Kara (2019), kapasite içermeyen tek atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için tek amaç fonksiyonuna sahip ilk doğrusal olmayan en iyileme formülasyonunu tanıtmışlardır. Araç hızı ve yükü göz önünde bulundurarak enerji tüketimini hesaplamışlardır. Modeli, perspektif kesimlerinin faydalarını ve ikinci dereceden koni programlama yaklaşımını doğrusal olmayan en iyileme modellerine uygulayarak çözmüşlerdir.

Parsa vd. (2019), birkaç tamsayılı değişkeni olan çoklu atama yeşil anadağıtım üssü konum problemi için çok hedefli bir en iyileme modeli önermişlerdir. Toplam taşıma ve anadağıtım üssü açma maliyetlerini, toplam sera gazı salınımlarını, enerji tüketimini ve gürültü kirliliğini en aza indirmeyi amaçlanmıştır. Her amaç fonksiyonunun bir ticari çözücünden elde edilen çözümünü, birkaç çok kriterli karar verme yöntemini kullanarak birleştirmişlerdir.

Bu çalışmada yeşil anadağıtım üssü kapsama akış problemine odaklanarak, yeşil yaklaşımları ele alan yeşil anadağıtım üssü konum problemi gibi üzerinde az sayıda çalışma olan bir konuya katkıda bulunmak amaçlanmıştır. Yazında yukarıdaki makaleler incelenerek, yazarın bildiği kadarıyla bu makale doğrusal tamsayılı ve kapasiteli ilk tek amaç fonksiyonlu yeşil anadağıtım üssü kapsama modelini içermektedir.

MATEMATİK MODEL

Bu bölümde kapasitesiz (TAYAÜKAP) ve kapasiteli (KTAYAÜKAP) tek atamalı yeşil anadağıtım üssü kapsama akış problemi tanıtılmıştır. Bu makalede geliştirilen formülasyonlar Lowe ve Sim (2013)'in çalışmasına hem bağlantılar hem de düğümler üzerinde kapasite kısıtlarıyla birlikte karbon salınım maliyeti eklenerek oluşturulmuştur. Bütün modellerde kullanılacak olan matematiksel kısaltma gösterimleri şu şekildedir:

d	Düğümler kümesi
t_{ij}	i . düğümden j . düğüme olan talep miktarı ($i, j \in d$)
T	Sistemdeki toplam talep miktarı
o_i	i . düğümden gönderilen toplam talep miktarı ($i \in d$)
q_j	j . düğüme gelen toplam talep miktarı ($j \in d$)

k_i^D	i . düğümdeki en büyük kapasite miktarı ($i \in d$)
k_{ik}^B	i . düğümle k . anadağıtım üssü arasındaki bağlantının en büyük kapasite miktarı ($i, j \in d$)
f_k	k . anadağıtım üssünü açma maliyeti
c_{ij}	Bir birim ürünün i . düğümle j . düğüm arasında taşınmasının maliyeti ($i, j \in d$)
ρ	Bir birim karbon salınımının maliyeti
e_{ij}	Bir birim ürünün i . düğümle j . düğüm arasında taşınmasından doğan karbon salınım miktarı ($i, j \in d$)
m_{ij}	i . düğümle j . düğüm arasındaki mesafe ($i, j \in d$)
A_{ik}	i . düğümün k . anadağıtım üssü tarafından kapsanıp ($A_{ik} = 1$) kapsanmaması ($A_{ik} = 0$) parametresi
α	Anadağıtım üsleri arasındaki taşıma için indirim çarpanı

Burada $o_i = \sum_{j \in d} t_{ij}$, $q_j = \sum_{i \in d} t_{ij}$ ve $T = \sum_{i,j \in d} t_{ij}$ olduğu açıktır. x_{ik} sıfır-bir değişkeni ($\forall i, k \in d$), i . düğümünün k . anadağıtım üssüne bağlı olup olmadığını simgeler ('1' bağlantının var olduğunu ve '0' ise bağlantının olmadığını gösterir). x_{kk} 1'e eşit olduğunda k . düğüm bir anadağıtım merkezi olarak hizmet vermesi genel kabuldür. k . düğümde bir anadağıtım üssü kurmak ve işletmekle ilişkili yıllık maliyetler, için f_k ($\forall k \in d$) tarafından ifade edilir. y_{ikl} değişkeni ($\forall i, k, l \in d$) başlangıcı i . düğümünden olan ve ilk olarak k . anadağıtım üssüne daha sonra l . anadağıtım üssüne ilerleyen akışın veya 'emtiyanın' miktarını temsil eder. İlk olarak önerdiğimiz TAYAÜKAP modelinin matematiksel gösterimini yapacak olursak:

$$enk. \varpi = \sum_{k \in d} f_k x_{kk} + \alpha \sum_{i,k,l \in d} c_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} c_{ik} x_{ik} (o_i + q_i) + \rho (\sum_{i,k,l \in d} e_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} e_{ik} x_{ik} (o_i + q_i)) \quad (1)$$

$$\text{öyle ki } x_{ik} \leq A_{ik} x_{kk} \quad \forall i, k \in d, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in d} x_{ik} = 1 \quad \forall i \in d, \quad (3)$$

$$\sum_{j \in d} t_{ik} x_{jk} + \sum_{l \in d} y_{ikl} - \sum_{l \in d} y_{ilk} = o_i x_{ik} \quad \forall i, k \in d, \quad (4)$$

$$\sum_{l \in d, l \neq k} y_{ikl} \leq o_i x_{ik} \quad \forall i, k \in d, \quad (5)$$

$$y_{ikl} \geq 0 \quad \forall i, k, l \in d, \quad (6)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in d. \quad (7)$$

Amaç fonksiyonu (1) ndaki dört terim sırasıyla; yıllık anadağıtım üssü açma sabit maliyeti, anadağıtım üsleri arasındaki taşımanın maliyeti, bir ana dağıtım üssü olmayan düğümünden anadağıtım üssüne olan taşımanın maliyeti ve toplam taşımalarından kaynaklı oluşan karbon salınımının maliyetidir. İkinci kısıt (2), belirli bir i . düğümünün, i . düğümünü kapsayan bir k . anadağıtım üssüne atanmasını garanti eder. Üçüncü (3) ve yedinci (7) kısıt, her bir düğümün sadece ve sadece bir anadağıtım üssüne atanmasını sağlar. Dördüncü kısıt (4) ise akış miktarlarının korunması içindir. Beşinci kısıt (5), Correia vd., (2014) tarafından gösterimden kaynaklanan akış miktarlarındaki eksikliği gidermek için önerilmiştir. Altıncı (6) ve yedinci (7) kısıtlar karar değişkenlerinin işaret kısıtlarını göstermektedir.

Bu gösterim için ayrıca bir kapasite kısıt kümesi geliştirilmiştir:

$$\sum_{i,l \in d} y_{ikl} \leq k_k^D \quad \forall k \in d, \quad (8)$$

Sekizinci kısıt (8), k . anadağıtım üssünün depolayabileceği en büyük kapasitenin k_k^D olmasını sağlamaya yöneliktir. TAYAÜKAP modelinin kapasiteli hali:

KTAYAÜKAP: Denklem (1-7) ve (8),

Burada amaç fonksiyonundaki (1) karbon salınım maliyeti çıkarılarak modeldeki değişimi incelemeyi amaçladığımız TAYAÜKAP ve KTAYAÜKAP modelleri ile ilişkili olarak sırasıyla TAAÜKAP ve KTAAÜKAP, modelleri de çözdürülmüştür.

SAYISAL ANALİZ

Bu çalışmada, sayısal çalışmamızda popüler ve açık kaynaklı 25 ABD şehrini içeren CAB (Beasley, 1990) ve 81 Türkiye şehrini içeren TR (Yetis Kara, 2017) veri setleri kullanıldı. TR veri seti, birim akış maliyetleri, anadağıtım üssü açılış maliyetleri, ağ bağlantılarının uzunlukları ve talep akışları da dahil olmak üzere tam bir veri setidir. TR ve CAB veri setleri arasındaki en büyük fark, CAB veri setinde uzaklıklar simetrik iken, TR veri setinde asimetric

bir yapıya sahiptir. CAB veri seti sadece düğümler arasındaki bağlantı uzunluklarını ve talep akışlarını içerir. CAB için eksik verileri tamamlamak için Lowe ve Sim (2013)'in çalışmasındaki yaklaşımlar kabul edilmiştir. c_{ij} 'nin, m_{ij} 'nin bir oranı olduğu varsayılmıştır ($c_{ij} = \frac{m_{ij}}{25000} \forall i, j$). TR veri kümesi için, anadağıtım üssü açma maliyetini ise 100'le çarpılarak modelden daha makul sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. CAB veri kümesi için anadağıtım üssü açma maliyeti tüm düğümler için aynı kabul edilmiştir.

Anadağıtım üssü kapsama mesafesini hesaplamak için; ağdaki en uzun bağlantı mesafesi ve bir kapsama oranı, Δ , çarpılarak hesaplanır. Burada Δ 'yı belirlerken alt ağlarda bağlantısız bir yapı kalmamasına dikkat edilir. Bağlantı, k_{ik}^B , ve anadağıtım üssü, k_i^D , kapasiteleri hem CAB hem de TR veri kümesinde bulunmamaktadır. Bu sebeple Sener ve Feyzioğlu (2021)'nin geliştirdiği yöntem kullanılmıştır. Burada belirlenen kapasite sistemdeki toplam akışın bir yüzdesidir. Karbon salınım miktarlarının tespitinde Smart Freight Centre (2021)'in önerdiği yöntem kullanılmıştır. Birim karbon salınım maliyeti, ρ , için The World Bank (2021)'tan CAB için California, İsviçre ve Massachusetts; TR için ise MIKTA üyesi ülkelerden, Avustralya, Güney Kore ve Meksika verileri kullanılmıştır. Kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Seçilmiş Parametreler

Parametreler	CAB	TR
f_k	[10.000;20.000;30.000]	Veri Kümesinde Var
α	[0,2;0,5;0,8]	[0,4;0,6;0,8]
Δ	[0,6;0,7;0,8]	[0,55;0,65;0,75]
ρ	[8,26;16,89;104,65]	[4,07;10,64;11,24]
k_i^D	$T * [0, 1; 0, 2; 0, 3]$	

Burada üç temel performans ölçütünü inceleyeceğiz. Bunlardan ilki açılan anadağıtım üssü sayısı (AÜS)'dir. İkincisi ise, karbon salınım miktarlarındaki yüzdesel değişim (KSD) ise karbon salınım maliyetli modellerdeki salınımın ($\sum_{i,k,l \in d} e_{kl} y_{ikl} + \sum_{i,k \in d} e_{ik} x_{ik} (o_i + q_i)$) yüzdesel olarak karbon salınım maliyeti olmayan modellerden yüzdesel olarak ne kadar fazla olduğudur. Üçüncüsü ise toplam maliyetteki değişim (TMD) kapasitesiz model için şu şekilde hesaplanır:

$$TMD = 100 * \frac{\omega_{TAAÜKAP} - \omega_{TAYAÜKAP}}{\omega_{TAAÜKAP}}$$

Kapasiteli model için de aynı yaklaşım kullanılarak hesaplama yapılır.

Tüm modeller Gurobi 10.0.1 ticari çözücüsü kullanılarak, Intel i9 işlemcili (2.50 GHz) 16 GB rame sahip bir dizüstü bilgisayarda çözdürülmüştür. Tüm çözüm zamanları gerçek zaman ölçümü olarak saniye cinsinden verilmiştir. Çözüm süresi istatistikleri Tablo 2'de verilmiştir. Beklenildiği gibi ağdaki düğüm sayısı arttıkça ve anadağıtım üsslerine kapasite kısıtı koyuldukça çözüm süresi artmaktadır.

Tablo 2. Çözüm Süresi İstatistikleri (Saniye)

	Modeller	En Küçük	En Büyük	Ortalama
CAB	TAYAÜKAP	0,61	29,57	6,13
	KTAYAÜKAP	0,66	344,24	34,73
TR	TAYAÜKAP	154,83	658,38	370,77
	KTAYAÜKAP	168,03	26643,24	2061,73

Tüm sonuçları incelediğimizde Δ 'nın CAB veri kümesi kullanılarak çözülen modeller üstünde çok büyük bir etkisi bulunmadığından yarıçap ortalamaları alınarak Tablo 3 ve 4 oluşturulmuştur. Tablo 3'teki performans ölçütlerini incelersek;

- AÜS değeri en fazla ρ 'dan etkilenmektedir. Burada ρ 'daki artış neredeyse AÜS değerini iki katına çıkarmaktadır. AÜS üzerindeki diğer çok önemli faktör f_k 'dir. Bu değer arttıkça, AÜS ρ 'ya bağlı olarak neredeyse üçte birine inmektedir. AÜS üstündeki en az öneme sahip parametre ise α 'dır. α arttıkça diğer parametrelere bağlı hafif bir azalma olmaktadır.
- KSD, AÜS gibi en fazla ρ değişimine tepki göstermektedir. Burada KSD en iyi değerlere ρ 'nun en yüksek değerlerinde ulaşmaktadır. Ölçek ekonomisi kaynaklı indirim miktarı arttıkça KSD değerleri karbon

salımsız modele göre iyi olmasına rağmen kötüleşmektedir. f_k 'ya karşı KSD'nin tepkisi kubbe şekli teşkil etmektedir.

- TMD için en anlamlı değişim en yüksek karbon salınım maliyeti seviyesinde görülmektedir. α azaldıkça TMD değerleri de azalmaktadır. f_k ile TMD arasında anlamlı bir ilişki kurulamamaktadır.

Tablo 3. TAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (CAB Veri Kümesi için, Δ üzerine ortalama alınmış)

ρ		8,26			16,89			104,65		
f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
10.000	0,8	10	13,7	2,16	12	20,4	4,96	24	34,6	19,96
	0,5	12	10,3	0,75	12	10,3	2,47	24	26,3	13,90
	0,2	12	10,3	1,54	12	10,3	3,48	24	26,3	15,26
20.000	0,8	6	19,0	2,32	6	19,0	5,25	15	39,5	23,74
	0,5	6	6,3	0,59	7	10,4	1,69	15	30,0	16,36
	0,2	6	6,7	0,76	7	10,8	2,63	16	31,3	17,86
30.000	0,8	4	12,9	0,62	4	12,9	2,73	12	37,7	20,50
	0,5	5	13,6	1,89	5	13,6	4,05	12	35,3	20,01
	0,2	5	0,3	0,04	5	0,3	0,10	12	25,4	15,26

Tablo 4'te verilen elde edilen sonuçlar incelenirse;

- AÜS, ρ 'ya karşı kapasite miktarı belirli bir seviyenin üstünde iken kapasitesiz modeldeki davranışları sergilediği, bu değer belirli bir miktarın altına düştüğünde ise tam tersi olarak değişime uğradığı görülmektedir. Yine aynı şekilde kapasitenin bir sınırdan fazla olduğu durumlarda kapasite AÜS'te çok büyük değişimlere sebep olmazken, aksi durumda AÜS'te aşırı bir azalmaya sebep olacaktır. AÜS, f_k ve α 'daki değişimlere kapasitesiz modele benzer tepkiler göstermektedir.
- Kapasite üzerine konulan kısıtın daha sınırlayıcı olduğu durumlarda karbon salınım miktarındaki değişim aşırı azalmaktadır. KSD, f_k , ρ ve α 'daki değişimlere kapasitesiz modeldekine benzer tepkiler göstermektedir.
- k_i^D ne kadar fazlaysa TMD'yi de o kadar arttırmaktadır. Tam aksi durumda da genellikle azalmasına neden olmaktadır. TMD de AÜS ve KSD gibi genellikle diğer parametrelere kapasitesiz modelde gösterdiği tepkiyi göstermektedir.

Tablo 5 ve 6'da TR veri kümesi kullanılarak elde edilen sonuçlar özetlenmiştir. Tablo 5'ten yola çıkarak sonuçları incelersek;

- AÜS, Δ ve α azaldıkça artmaktadır. Bu iki parametreye ters olarak, ρ ile AÜS aynı yönlü hareket etmektedirler.
- KSD, parametrelere AÜS'ün gösterdiği tepkilerin aynısını göstermektedir.
- TMD, parametrelere AÜS ve KSD'ye benzer reaksiyonlar oluşturmaktadır.

Tablo 6'daki performans ölçütlerinin değişimleri incelenecek olursa;

- AÜS ve ρ arasındaki ilişkiyi inceleyecek olursak, k_i^D belirli bir seviyenin üstündeyse bu ilişki TAYAÜKAP modelinin sonuçlarında gözlemlenen ilişki ile aynıdır, bu değer belirli bir miktarın altına düştüğünde ise tam tersi olduğu anlaşılmaktadır. Yüksek kapasite seviyelerinde AÜS'te genellikle aşırı bir değişim gözlenmezken, daha düşük kapasite seviyelerinde aşırı bir düşüş olmaktadır. AÜS, Δ ve α 'daki değişimlere genellikle kapasitesiz modele benzer tepkiler göstermektedir.
- k_i^D azaldıkça genellikle KSD de azalmaktadır. Kapasitesiz modelin aksine KSD, Δ ve α arasındaki ilişki doğrusal ifadelerle açıklanamamaktadır.
- k_i^D ile TMD arasındaki ilişki KSD ile olan ilişki ile benzer yapıdadır. TMD'nin diğer parametrelerle olan ilişkisi genellikle kapasite miktarına bağlı olarak değişkenlik gösteren bir yapıdadır.

Tablo 4. KKTAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (CAB Veri Kümesi için, Δ üzerine ortalama alınmış)

	ρ		8,26			16,89			104,65		
	f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
$k_i^p = 0,3 * T$	10.000	0,8	10,0	13,7	2,2	12,0	20,4	5,0	24,0	34,6	20,0
		0,5	12,0	10,3	0,7	12,0	10,3	2,5	24,0	26,3	13,9
		0,2	12,0	10,3	1,5	12,0	10,3	3,5	24,0	26,3	15,3
	20.000	0,8	6,0	19,0	2,3	6,0	19,0	5,2	15,0	39,5	23,7
		0,5	6,0	6,3	0,6	7,0	10,4	1,7	15,0	30,0	16,4
		0,2	6,0	6,7	0,8	7,0	10,8	2,6	16,0	31,3	17,9
	30.000	0,8	4,0	12,9	0,6	4,0	12,9	2,7	12,0	37,7	20,5
		0,5	5,0	13,6	1,9	5,0	13,6	4,1	12,0	35,3	20,0
		0,2	5,0	0,3	0,0	5,0	0,3	0,1	12,0	25,4	12,0
$k_i^p = 0,2 * T$	ρ	8,26			16,89			104,65			
		f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD
	10.000	0,8	10,0	13,7	2,2	12,0	19,9	4,9	24,0	34,6	20,0
		0,5	12,0	7,2	0,1	12,0	7,2	1,4	24,0	24,2	12,1
		0,2	12,0	7,2	0,7	12,0	7,2	2,1	24,0	24,2	13,4
	20.000	0,8	6,0	13,3	1,6	6,0	13,3	3,6	16,0	37,0	20,5
		0,5	6,0	1,9	0,2	8,0	9,8	0,6	16,0	28,7	14,3
		0,2	6,0	0,0	0,0	8,0	9,8	1,3	17,0	29,9	15,6
	30.000	0,8	4,0	13,5	1,2	4,0	13,5	3,3	12,0	37,7	20,7
0,5		6,0	21,7	2,4	6,0	21,7	6,1	12,0	38,1	23,1	
0,2		6,0	0,0	0,0	6,0	2,0	0,2	12,0	22,4	10,1	
$k_i^p = 0,1 * T$	ρ	8,26			16,89			104,65			
		f_i	α	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD
	10.000	0,8	3,0	9,6	1,4	3,0	10,7	3,0	1,0	13,9	8,8
		0,5	3,3	2,6	0,2	3,3	2,6	0,6	3,0	5,9	2,6
		0,2	3,7	2,2	0,3	3,7	2,2	0,6	4,0	3,6	2,4
	20.000	0,8	2,0	10,0	1,3	1,7	11,3	2,9	1,0	14,9	9,9
		0,5	2,0	0,9	0,1	2,0	2,1	0,3	2,3	5,2	2,7
		0,2	2,0	0,9	0,0	2,3	3,1	0,3	2,6	7,1	3,1
	30.000	0,8	1,7	9,1	1,0	1,3	10,2	2,5	1,0	12,7	8,5
0,5		2,0	0,9	0,1	2,0	2,1	0,3	1,0	7,4	3,3	
0,2		2,0	0,9	0,0	2,0	1,8	0,2	2,3	7,4	2,9	

Tablo 5. TAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (TR Veri Kümesi için)

ρ	α	4,07			10,64			11,24		
		AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
0,8	0,75	23	24,3	9,0	32	33,5	20,0	32	33,5	20,6
	0,65	25	23,9	6,5	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
	0,55	25	25,1	7,9	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
0,6	0,75	28	27,2	11,9	38	35,1	22,5	38	35,4	23,1
	0,65	30	26,9	10,8	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
	0,55	31	27,6	10,8	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
0,4	0,75	34	30,9	15,6	46	38,3	25,8	47	38,5	26,4
	0,65	34	30,4	15,3	48	38,4	25,7	47	38,7	26,3
	0,55	35	29,6	14,9	48	37,8	25,4	48	38,6	26,0

Şekil 1 ve Şekil 3'te TAYAÜKAP modeli için CAB ve TR veri kümesi kullanılarak, orta parametre değerleri için karbon salınım maliyetlerindeki değişimin her bir düğümden salınan karbon miktarları ve açılan anadağıtım üslerinin konumları görülmektedir. Bu şekilden açıkça anlaşılacağı gibi Şekil 3'te karbon maliyetinin arttırılması anadağıtım üssü sayısını arttırdığı ve aşırı karbon salınımı olan düğüm sayısında ise azalmayla sonuçlandığı çıkarımı yapılabilir.

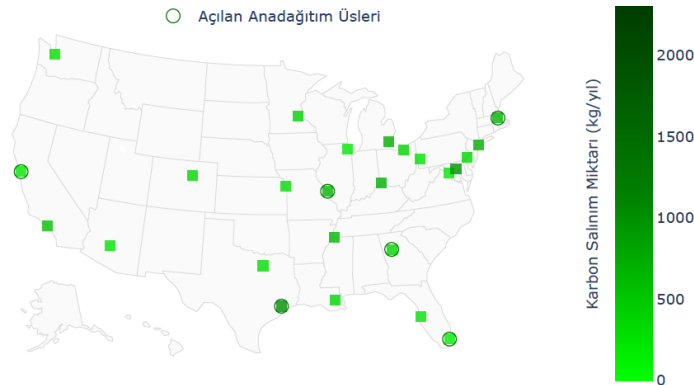
Şekil 4'te ise maliyet değişiminin karbon salınımı fazla olan düğüm sayısına etkisinin gözlemlenemediği sonucu çıkarılabilir.

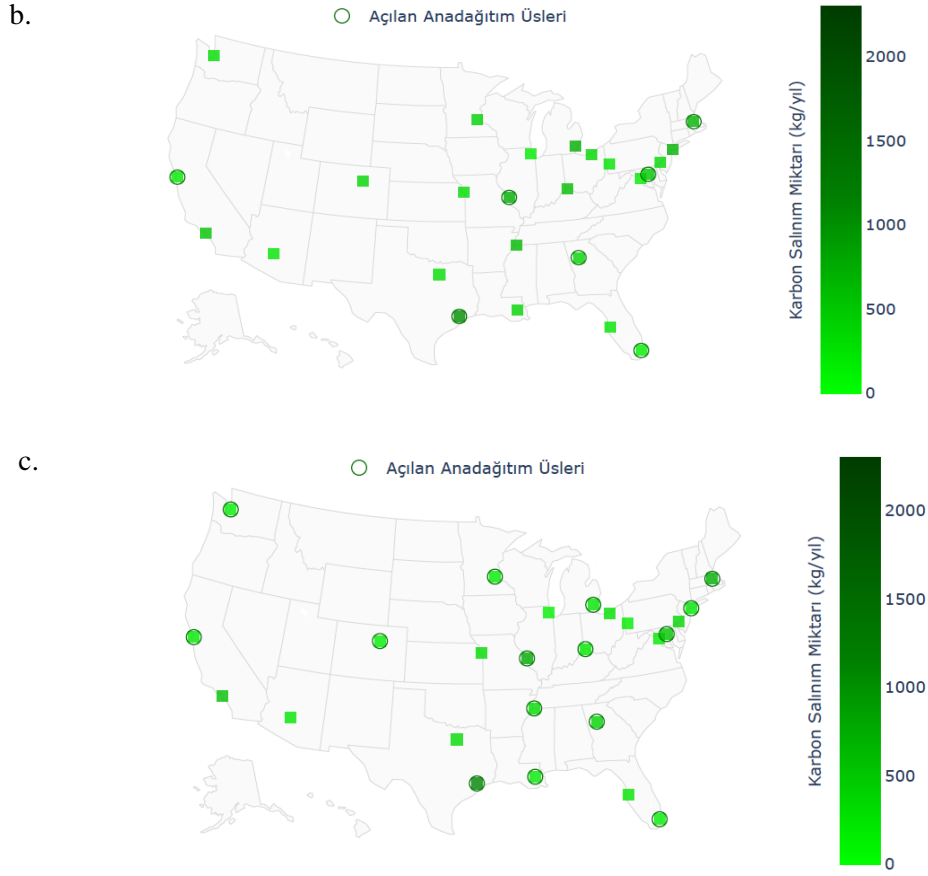
Şekil 2 ve Şekil 4'te ise KTAYAÜKAP modeli için CAB ve TR veri kümesi kullanılarak, orta parametre değerleri için karbon salınım maliyetlerindeki ve kapasitedeki değişimin her bir düğümde salınan karbon miktarları ve açılan anadağıtım üslerinin konumları görülmektedir. Şekil 2'de daha az miktarda belirlenen kapasitenin karbon salınımı fazla olan düğüm sayısını fazlaştırdığı açıkça gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, bu model kapasitesizdeki gibi karbon salınım maliyetine tepki vermektedir. Şekil 4'te ise karbon salınımının aşırı karbon salınan düğüm sayısı üzerinde bir etkisi olmadığı bunu yerine kapasitenin artırılmasının düğüm sayısını aşırı bir şekilde azalttığı açıklar.

Tablo 6. KTAYAÜKAP Çözüm İstatistikleri (TR Veri Kümesi için)

	ρ	4,07			10,64			11,24			
		Δ	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD	AÜS	KSD	TMD
$k_t^p = 0,3 * \Gamma$	0,8	0,75	23	24,3	9,0	32	33,5	20,0	32	33,5	20,6
		0,65	25	23,9	6,5	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
		0,55	25	25,1	7,9	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
	0,6	0,75	28	26,9	11,9	38	35,1	22,5	38	35,4	23,1
		0,65	30	26,9	10,8	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
		0,55	32	26,2	10,8	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
	0,4	0,75	34	30,9	15,6	46	38,3	25,8	47	38,5	26,4
		0,65	34	30,4	15,3	47	38,2	25,7	47	38,7	26,3
		0,55	35	29,6	14,9	48	37,8	25,4	48	38,6	26,0
$k_t^p = 0,2 * \Gamma$	0,8	0,75	25	28,7	7,9	32	33,7	19,9	32	33,7	20,6
		0,65	25	27,5	5,7	32	32,4	18,3	32	32,9	18,9
		0,55	28	29,0	7,3	32	33,7	19,5	32	34,1	20,1
	0,6	0,75	30	29,0	11,6	38	35,6	22,8	38	35,8	23,4
		0,65	31	29,4	10,3	37	34,9	21,8	39	35,6	22,4
		0,55	35	29,9	10,4	38	35,6	22,1	39	36,0	22,7
	0,4	0,75	34	32,5	15,7	46	38,6	26,2	47	38,9	26,8
		0,65	35	30,8	15,5	47	38,5	26,1	47	39,0	26,7
		0,55	25	30,5	15,4	48	38,4	26,0	48	39,2	26,6
$k_t^p = 0,1 * \Gamma$	0,8	0,75	5	2,6	1,1	5	2,6	1,9	5	2,6	1,9
		0,65	12	0,4	0,2	14	0,7	0,4	14	0,7	0,4
		0,55	9	1,7	0,6	5	5,3	2,5	5	5,3	2,6
	0,6	0,75	8	2,2	0,4	5	2,5	1,5	5	2,5	1,5
		0,65	14	0,4	0,2	14	0,6	0,4	14	0,6	0,4
		0,55	17	1,9	0,5	13	3,4	1,3	12	3,6	1,4
	0,4	0,75	19	0,2	0,1	9	2,0	0,7	9	2,0	0,8
		0,65	18	0,2	0,1	18	0,2	0,2	18	0,2	0,2
		0,55	22	1,3	0,7	21	1,4	1,0	21	1,4	1,1

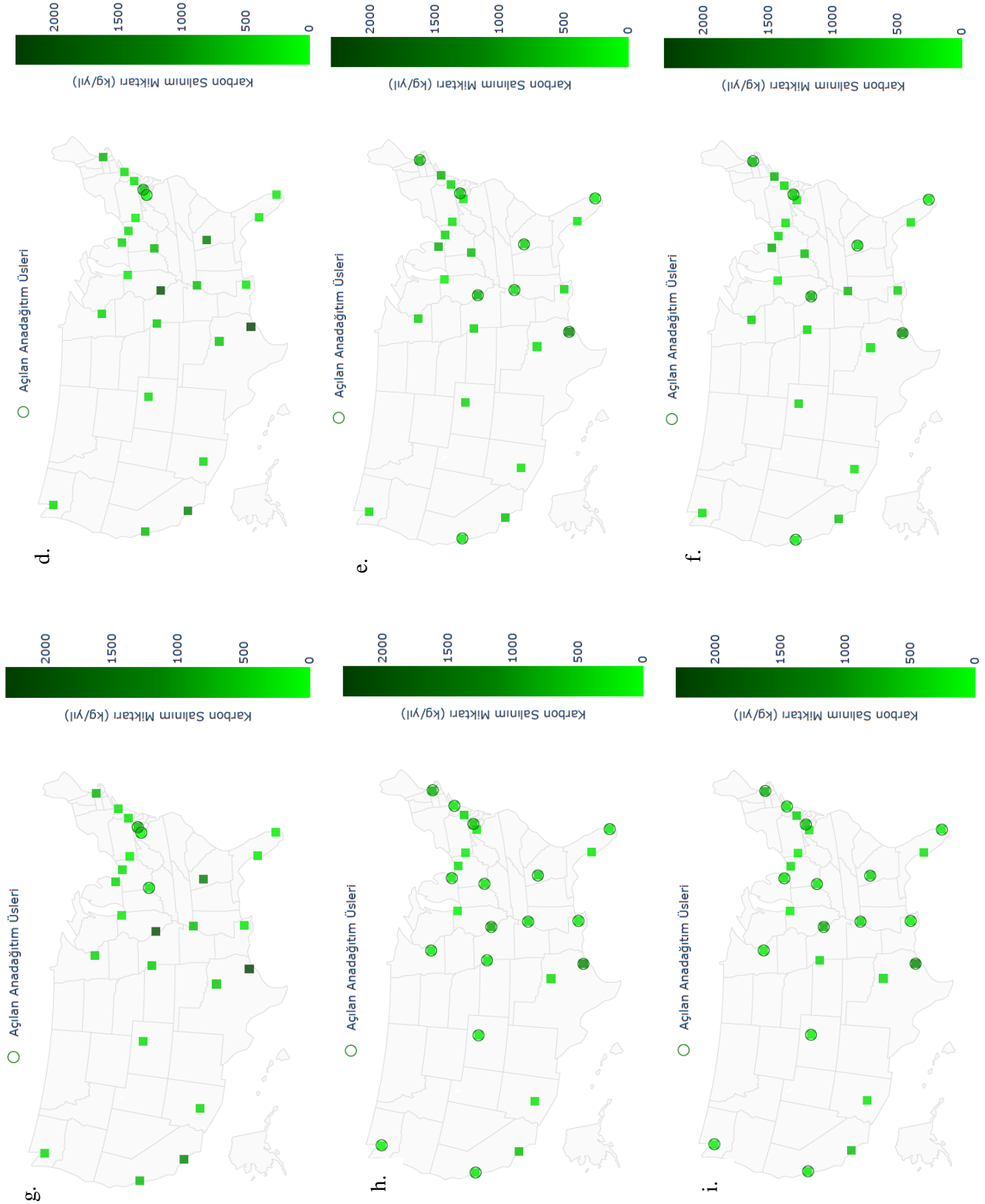
a.



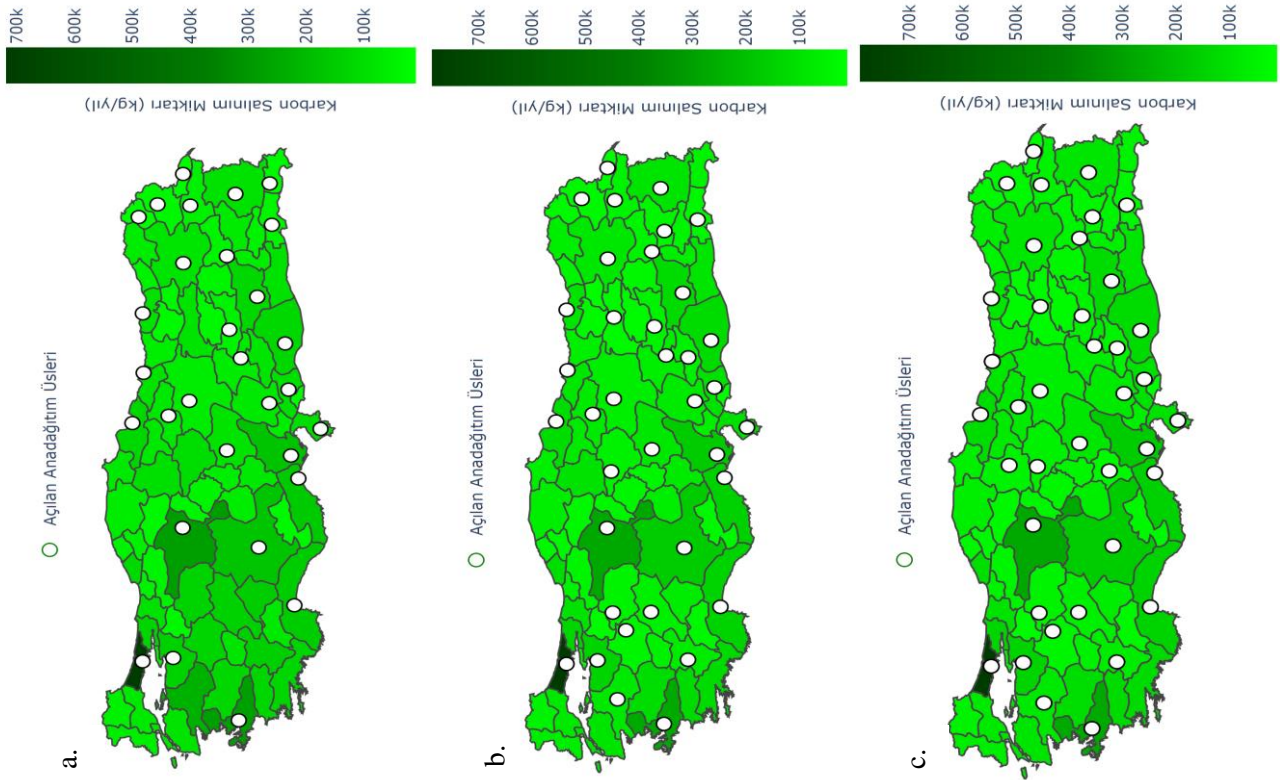


Şekil 1. TAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Döğümlemlerın Karbon Salınım Miktarları (CAB Veri Kumesi, $f_k = 20.000$; $\alpha = 0,5$; $\Delta = 0.7$) a. $\rho = 8,26$ b. $\rho = 16,89$ c. $\rho = 104,65$

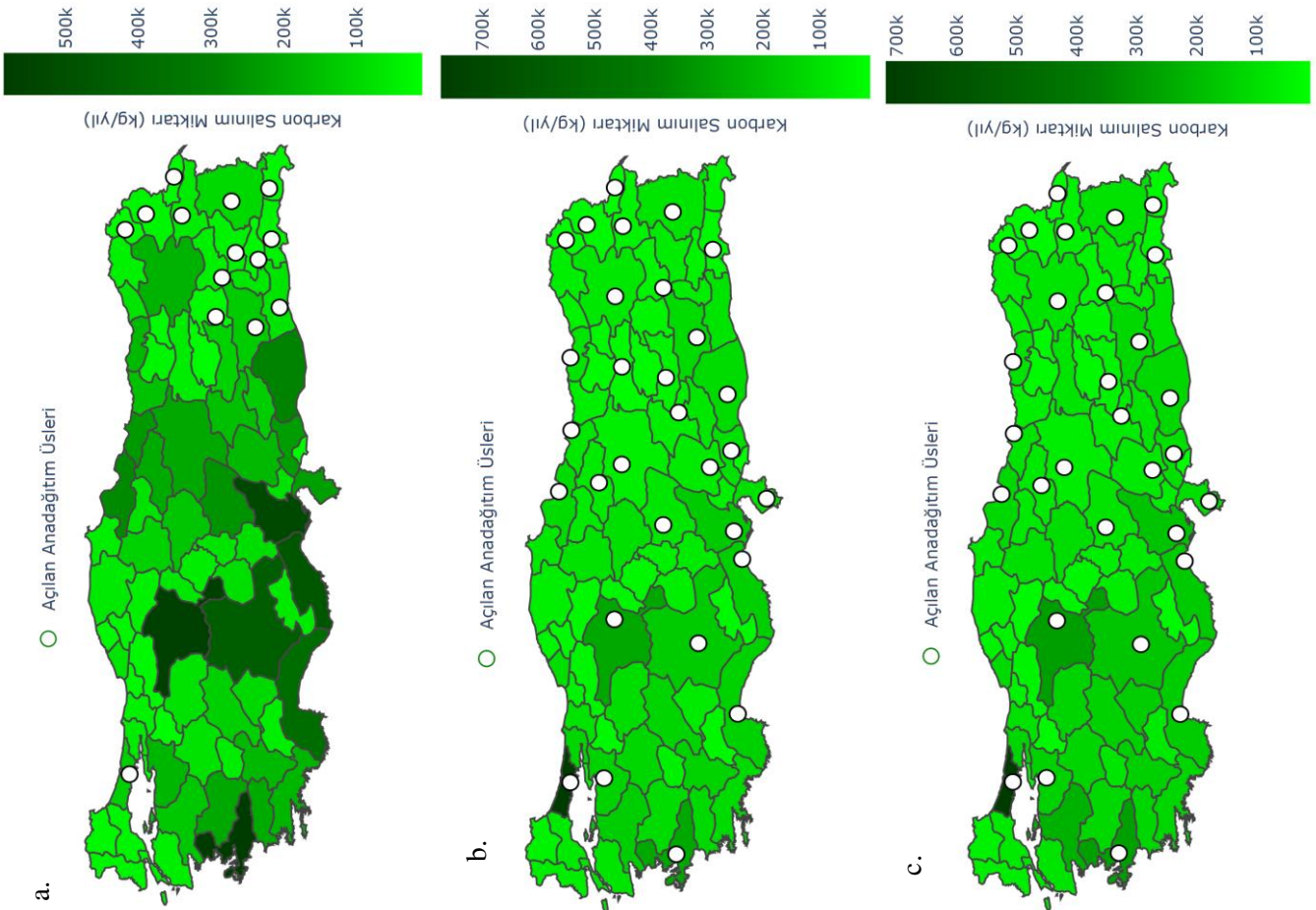


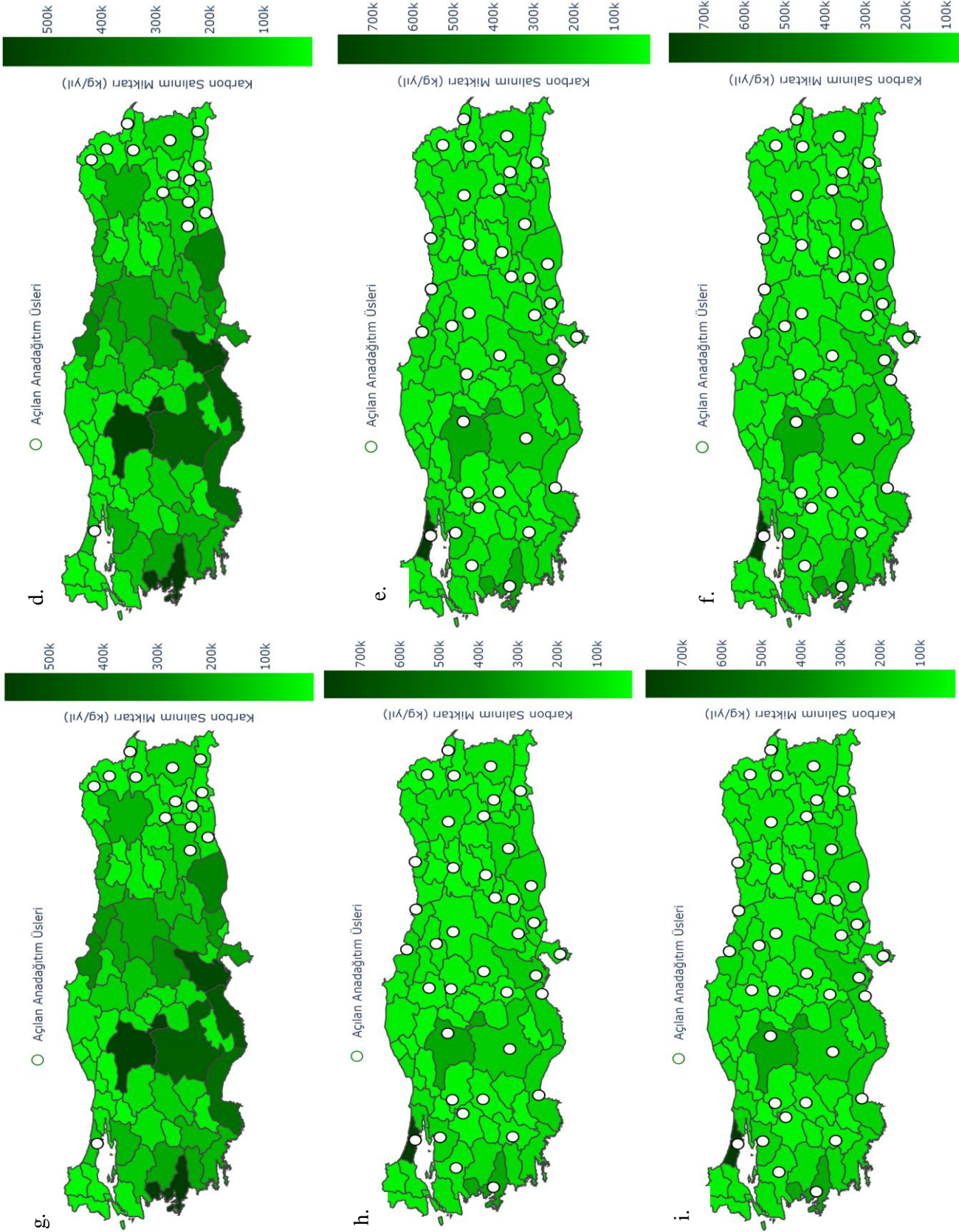


Şekil 2. KTAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Dğümlerin Karbon Salınım Miktarları (CAB Veri Kümesi, $f_k = 20.000$; $\alpha = 0,5$; $\Delta = 0,7$) **a.** $\rho = 8,26$; $k_i^D = 0,1 * T$ **b.** $\rho = 8,26$; $k_i^D = 0,2 * T$ **c.** $\rho = 8,26$; $k_i^D = 0,3 * T$ **d.** $\rho = 16,89$; $k_i^D = 0,1 * T$ **e.** $\rho = 16,89$; $k_i^D = 0,2 * T$ **f.** $\rho = 16,89$; $k_i^D = 0,3 * T$ **g.** $\rho = 104,65$; $k_i^D = 0,1 * T$ **h.** $\rho = 104,65$; $k_i^D = 0,2 * T$ **i.** $\rho = 104,65$; $k_i^D = 0,3 * T$



Şekil 3. TAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Dügümlerin Karbon Salınım Miktarları (TR Veri Kümesi; $\alpha = 0,6$; $\Delta = 0,65$) a. $\rho = 4,07$ b. $\rho = 10,64$ c. $\rho = 11,24$





Şekil 4. KTAYAÜKAP Modeli İçin Açılan Anadağıtım Üsleri ve Düğümlerin Karbon Salınım Miktarları (TR Veri Kümesi; $\alpha = 0,6$; $\Delta = 0,65$) **a.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,1 * T$ **b.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,2 * T$ **c.** $\rho = 4,07$; $k_i^D = 0,3 * T$ **d.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,1 * T$ **e.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,2 * T$ **f.** $\rho = 10,64$; $k_i^D = 0,3 * T$ **g.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,1 * T$ **h.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,2 * T$ **i.** $\rho = 11,24$; $k_i^D = 0,3 * T$

Tüm bu sonuçları göz önüne alarak bazı çıkarsamalar yapılırsa;

- The World Bank (2021)'a göre Türkiye karbon salınım maliyetlendirmesi uygulamasına geçmeyi planlamaktadır. Amerika'da ise eyaletler bazında farklı uygulamalar mevcuttur. Bu çalışmada eğer karbon salınım maliyeti uygulanırsa bunun modelde dikkate alınmasının maliyet ve salınım miktarlarına etkisinin anlamlı olacağı sonucuna varılmıştır.
- Diğer bir sonuç fazla sayıda anadağıtım üssü açmak karbon salınımı üzerinde etkiye sahip değildir.
- Salınım üzerinde en fazla kapasite miktarının etkisi olduğu açıktır.

SONUÇLAR

Bu çalışma, karbon salınımını, anadağıtım üssü yer seçimini, akış maliyetlerini, kapsama kısıtları ve anadağıtım üssünün kapasite kısıtları gibi faktörleri dikkate alarak bir kalkış-varış ağı için en verimli yapıyı belirlemeyi amaçlamaktadır. İki düğüm arasındaki talebin en az bir merkez düğümü üzerinden yönlendirilmesi gerekmektedir. Çalışma, bir merkez düğümün, ona uzaklığın belirlenmiş bir değerden daha az olduğu bir merkez olmayan bir düğümü kapsayabileceğini varsayarken, merkezler arasında mesafe sınırlamasının olmadığını öngörür.

Elde edilen sonuçlara göre karbon salınımı miktarı ve maliyeti üzerindeki en büyük etkinin anadağıtım üsleri üzerindeki kapasite miktarları olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun yanı sıra karbon salınım ve anadağıtım üssü açma maliyeti arttıkça genellikle daha az anadağıtım üssü açıldığı gözlemlenmiştir. Bu anadağıtım üslerinin konumları talebin yüksek olduğu ve bununla beraber anadağıtım üssünün kapsamı dışında düğüm kalmayacak şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmadan çıkarılacak en önemli sonuçlardan biri de karbon salınım maliyeti eklemek TAYAÜKAP ve KTAYAÜKAP modellerinin TAAÜKAP ve KTAAÜKAP modellerinden %39,5 daha az karbon salınımına neden olacağıdır. Diğer bir ifadeyle önerilen modeller daha çevre dostu bir ağ tasarımı sağlamaktadır.

İleride bu çalışma çeşitli şekillerde genişletilebilir. Bu genişletmelere örnek olarak, çözüm sürelerinin uzunluğu dikkate alındığında daha büyük veri kümelerini çözmek için sezgisel çözüm yöntemleri geliştirilebilir. Bunun yanı sıra, sadece karbon salınımı değil sülfür salınımı vb. diğer çevreyi kirleten faktörler de modellemeye dahil edilebilir.

KAYNAKLAR

- Alumur Alev, S., & Yetis Kara, B. (2009). A Hub Covering Network Design Problem for Cargo Applications in Turkey. *The Journal of the Operational Research Society*, 60(10), 1349-1359.
- Beasley, J. E. (1990). OR-Library.
- Calik, H., Alumur Alev, S., Yetis Kara, B., & Karasan, O. E. (2009). A Tabu-Search based Heuristic for the Hub Covering Problem over Incomplete Hub Networks . *Computers & Operations Research* , 36(12), 3088-3096.
- Campbell, J. F. (1994). Integer Programming Formulations of Discrete Hub Location Problems. *European Journal of Operational Research*, 72(2), 387-405.
- Correia, I., Nickel, S., & Saldanha-da-Gama, F. (2014). Multi-Product Capacitated Single-Allocation Hub Location Problems: Formulations and Inequalities. *Networks and Spatial Economics*, 14(1), 1-25.
- Dukkanci, O., Peker, M., & Kara, B. Y. (2019). Green hub location problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 125, 116-139.
- Karimia, H., Bashiri, M., & Nickel, S. (2016). Capacitated Single Allocation P-Hub Covering Problem in Multi-modal Network Using Tabu Search. *International Journal of Engineering*, 29(6), 797-808.
- Lowe, T. J., & Sim, T. (2013). The hub covering flow problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 64(7), 973-981.
- Mohammadi, M., Torabi, S. A., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Sustainable hub location under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 89-115.
- Niknamfar, A. H., & Niaki, S. T. A. (2016). Fair profit contract for a carrier collaboration framework in a green hub network under soft time-windows: Dual lexicographic max–min approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 91, 129-151.

- Parsa, M., Nookabadi, A. S., Flapper, S. D., & Atan, Z. (2019). Green hub-and-spoke network design for aviation industry. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1377-1396.
- Sener, N. (2020). New Optimization Models for the Hub Covering Location Problem. Graduate School of Science and Engineering, Galatasaray University.
- Sener, N., & Feyzioğlu, O. (2021). Capacitated Multiple Allocation Hub Covering Flow Problem. *MANAS Journal of Engineering*, 9, 72-84.
- Smart Freight Centre. (2021). Global Logistics Emissions Council Framework for Logistics Emissions.
- Tan, P. Z., & Yetis Kara, B. (2007). A Hub Covering Model for Cargo Delivery Systems. *Networks*, 49(1), 28-39.
- The World Bank. (2021). Carbon Pricing Dashboard. Geliş tarihi gönderen https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data
- Wagner, B. (2008). Model Formulations for Hub Covering Problems. *The Journal of the Operational Research Society*, 59(7), 932-938.
- Yetis Kara, B. (2017). Turkish Hub Data Set.
- Yetis Kara, B., & Tansel, B. (2003). The Single-Assignment Hub Covering Problem: Models and Linearizations. *The Journal of the Operational Research Society*, 54(1), 59-64.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.08.2023
Kabul Tarihi : 21.09.2023

Received Date : 17.08.2023
Accepted Date : 21.09.2023

IMAGE FUSION AND DEEP LEARNING BASED EAR RECOGNITION USING THERMAL AND VISIBLE IMAGES

TERMAL VE GÖRÜNÜR GÖRÜNTÜLER KULLANILARAK GÖRÜNTÜ BİRLEŞTİRME VE DERİN ÖĞRENME TABANLI KULAK TANIMA

Mücahit CİHAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-1426-319X)
Murat CEYLAN¹ (ORCID: 0000-0001-6503-9668)

¹ Konya Technical University, Electrical and Electronics Engineering, Konya, Türkiye

* Corresponding Author / Sorumlu Yazar: Mücahit CİHAN, mcihan@ktun.edu.tr

ABSTRACT

Advances in imaging and deep learning have fueled interest in ear biometrics, as the structure of the ear offers unique identification features. Thermal and visible ear images capture different aspects of these features. Thermal images are light-independent, and visible images excel at capturing texture details. Combining these images creates more feature-rich composite images. This study examines the fusion of thermal and visible ear images taken under varying lighting conditions to enhance automatic ear recognition. The image fusion process involved three distinct multiresolution analysis methods: discrete wavelet transform, ridgelet transform, and curvelet transform. Subsequently, a specially designed deep learning model was used for ear recognition. The results of this study reveal that employing the complex-valued curvelet transform and thermal images achieved an impressive recognition rate of 96.82%, surpassing all other methods. Conversely, visible images exhibited the lowest recognition rate of 75.00%, especially in low-light conditions. In conclusion, the fusion of multiple data sources significantly enhances ear recognition effectiveness, and the proposed model consistently achieves remarkable recognition rates even when working with a limited number of fused ear images.

Keywords: Ear recognition, image fusion, deep learning, multi-resolution analysis methods, thermal and visible images.

ÖZET

Görüntüleme ve derin öğrenme alanındaki gelişmeler, kulağın yapısı benzersiz tanımlama özellikleri sunduğundan kulak biyometrisine olan ilgiyi artırmıştır. Termal ve görünür kulak görüntüleri bu özelliklerin farklı yönlerini yakalar. Termal görüntüler ışıktan bağımsızdır ve görünür görüntüler doku ayrıntılarını yakalamada mükemmeldir. Bu görüntülerin birleştirilmesi daha zengin özelliklere sahip kompozit görüntüler oluşturur. Bu çalışma, otomatik kulak tanımayı geliştirmek amacıyla farklı aydınlatma koşulları altında elde edilen termal ve görünür kulak görüntülerinin birleştirilmesini incelemektedir. Görüntü birleştirme işlemi üç farklı çok çözünürlüklü analiz yöntemini içermektedir: ayrık dalgacık dönüşümü, ridgelet dönüşümü ve curvelet dönüşümü. Ardından, kulak tanıma için özel olarak tasarlanmış derin öğrenme modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, karmaşık değerli curvelet dönüşümü ve termal görüntülerin kullanılmasının, diğer tüm yöntemleri geride bırakarak %96.82 gibi etkileyici bir tanıma oranı elde ettiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, görünür görüntüler özellikle düşük ışık koşullarında %75.00 ile en düşük tanıma oranını sergilemiştir. Sonuç olarak, birden fazla veri kaynağının birleştirilmesi kulak tanıma etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır ve önerilen model, sınırlı sayıda birleştirilmiş kulak görüntüsüyle çalışırken bile tutarlı bir şekilde dikkate değer tanıma oranlarına ulaşmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kulak tanıma, görüntü birleştirme, derin öğrenme, çoklu çözünürlüklü analiz yöntemleri, termal ve görünür görüntüler

ToCite: CİHAN, M., & CEYLAN, M., (2023). IMAGE FUSION AND DEEP LEARNING BASED EAR RECOGNITION USING THERMAL AND VISIBLE IMAGES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 997-1009.

INTRODUCTION

Biometrics are biological measurements or physical characteristics that can be used to identify individuals (Jain et al., 2007). These traits can be chemical-based, such as DNA, physical-based, like fingerprinting, or behavioral-based, such as gait. These features are unique to each individual, akin to an individual's signature. Biometric systems offer the advantage of stability and durability. Biometric systems can identify a person despite minor differences and provide quick results. However, the primary disadvantage of biometric systems is that they are often considered invasive, and people may feel uncomfortable sharing their personal information. Additionally, the expense associated with biometric systems, including installation, operation, and maintenance costs, can be perceived as a drawback. Nevertheless, biometric systems possess the unique ability to recognize personal characteristics in various applications.

In addition to commonly used biometric systems such as fingerprint, iris, retina, and face recognition, extensive studies have been carried out on ear recognition. This is because the ear structure has some distinctive features for recognizing people. Initially, Iannarelli (1989) conducted experiments to prove that the ear structure is unique for all individuals. In his research, Iannarelli manually performed twelve measurements for different regions and thus detected differences. However, applying this approach to a real-world scenario is difficult. For this reason, many recent studies have focused on automating the ear recognition process by extracting new features for an effective system and developing new methods.

Ear images can be easily captured from profile or video images, making them more versatile compared to fingerprint and iris recognition, which require direct interaction with a sensor (Emeršič et al., 2017). These images can be obtained remotely, without requiring the subject's cooperation, making ear recognition technology similar to image-based biometric methods such as face and palm recognition. Some studies have even confirmed that even identical twins exhibit differences in certain features of their ear structure (Nejati et al., 2012). Furthermore, ear recognition systems can complement other biometric modalities, providing identification clues when information from other sources is unreliable or unavailable. Recent studies have demonstrated the importance of ear recognition technology in multimodal biometric systems (Sarangi et al., 2018; Sarangi et al., 2022; Ma et al., 2020; Maity et al., 2020).

While ear recognition offers many advantages, it also faces challenges that can impact the recognition process. One significant challenge is the illumination level in the environment where ear images are captured, which is a common drawback for biometric applications like ear and face recognition (Toygar et al., 2018; Jamil et al., 2014). To address this issue, an ear recognition method that can adapt to varying illumination conditions is crucial for effective ear biometry. An approach to tackle this problem is the active approach, which uses imaging modalities capable of acquiring images independently of illumination. For example, Abaza & Bourlai (2012) demonstrated that their proposed ear detection methods worked with promising results in both mid-wave infrared (MWIR) and visible bands, unlike previous approaches that only functioned in the visible spectrum. These two different spectrums each have their advantages and disadvantages. Thermal imaging is immune to illumination variations but may not capture texture features effectively, whereas visible images illuminated with sufficient light offer better texture feature representation. To harness the advantages of both methods and gather comprehensive information, this study combined thermal and visible images.

Ear recognition can be performed manually or automatically. Prior to automatic recognition, experimental studies highlighted the individual recognition potential of ears (Bertillon, 1896; Fields et al., 1960). Iannarelli made a significant contribution to this field with a long-term study on ear recognition (Iannarelli, 1989), using over ten thousand ear images. Subsequent to this pioneering work, the 1990s marked the advent of automatic ear recognition, with different methods being developed. Moreno et al. (1999) used geometric ear features and applied automatic classification with compression mesh. Victor et al. (2002) employed Principal Components Analysis (PCA) on ear images and achieved successful results. In another study, Gutiérrez et al. (2010) aimed to achieve recognition by segmenting ear image data into 12 different modules. Initially, they achieved a success rate of 91.85% without applying preprocessing. Subsequently, they applied preprocessing steps, including region of interest determination and wavelet transform. These preprocessing steps led to a notable increase in the recognition rate, reaching 97.5%. Pflug et al. (2014) conducted a comprehensive study using various feature extraction methods and achieved success with Linear Discriminant Analysis. More recently, deep learning methods, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs), have gained prominence in automatic ear recognition, offering robustness and tolerance to shape and visual variations (Galdámez et al., 2017). These networks automatically extract features from images, eliminating the need for separate feature extraction algorithms.

Deep learning methods have gained increasing prominence in recent times for automatic ear recognition. Among these methods, CNNs stand out as one of the most favored choices. When compared to traditional feature-based methods like Local Binary Patterns (LBP) (Benzaoui et al., 2015) or Histogram of Oriented Gradients (HOG) (Ciresan et al., 2011), CNNs exhibit significantly greater robustness and tolerance to variations in shape and visual aspects within images intended for recognition (Galdámez et al., 2017). Additionally, CNNs' convolution layers automatically extract features from images, eliminating the need for separate feature extraction algorithms. Alshazly et al. (2019) presented and compared manually crafted and CNN-based ear recognition models. They initially extracted features using seven different feature extraction methods and classified them using Support Vector Machines (SVM). Subsequently, they inputted ear images into AlexNet, a CNN architecture, and trained the model. The results indicated that the AlexNet architecture achieved a 22% higher success rate. Similar research employing the AlexNet architecture is available in the literature (Abd Almisreb et al., 2018). In another study, Emersic et al. (2017) achieved high accuracy rates, even with limited training data, using different CNN architectures such as VGG-16 and SqueezeNet. Furthermore, El Naggar & Bourlai (2022) attained impressive success rates of 98.76% for visible images and 96.93% for thermal images through pre-trained CNN architectures and transfer learning on various ear datasets obtained under the same lighting conditions. These studies collectively demonstrate that deep learning methods consistently outperform feature extraction-based machine learning methods in ear recognition applications. In some face recognition studies, researchers have successfully addressed illumination challenges by combining thermal and visible images (Kong et al., 2007; Choi et al., 2012; Seal et al., 2017). For instance, Kong et al. (2007) proposed combining visible and thermal images using a multi-scale data fusion method based on the Discrete Wavelet Transform (DWT) to enhance face recognition performance. However, there is limited research exploring the fusion of thermal and visible images for ear recognition. Ariffin et al. (2017) conducted one such study, combining images using simple fusion rules like simple average and mean average along with DWT. They extracted features from these images using the Histogram of Oriented Gradients (HOG) method and classified them using SVM, reporting improved results with fused images. In our study, we took a different approach, combining thermal and visible ear images using Multiresolution Analysis (MRA) methods. To our knowledge, no previous research has combined thermal and visible ear images using MRA and classified them using deep learning methods. In this context, the findings of our study represent a significant advancement in the field of ear recognition.

In this study, the DIAST dataset, which comprises both thermal and visible ear images, was used. In this phase, it was employed various MRA techniques to combine thermal and visible ear images. These fused images were subsequently employed to train and assess the performance of our custom-designed CNN model. It was conducted experimental studies under diverse illumination conditions to evaluate the effectiveness of our proposed method, and recognition rates were calculated to gauge its performance across different modalities. The key contributions of this study can be summarized as follows:

- **MRA-Based Fusion:** It was employed three distinct MRA methods for image fusion, allowing us to capture and amalgamate distinctive features present in thermal and visible ear images acquired under varying illumination conditions. These fusion techniques excel in preserving details, demonstrating improved generalization capabilities, and delivering superior visual results.
- **Unique CNN Model:** It was designed a specialized CNN model tailored for extracting ear features from the fused images. Impressively, this model achieved outstanding results while using a minimal number of parameters, even with the constraints of limited available data.
- **Enhanced Recognition:** The findings underscore the significant improvement in the success of ear recognition applications achieved through the fusion process. This enhancement in performance is particularly noteworthy when dealing with variations in illumination conditions.

In essence, our study showcases the potential of MRA-based fusion techniques in conjunction with a carefully crafted CNN model to significantly enhance the efficacy of ear recognition, even in challenging scenarios characterized by varying illumination levels.

METHODOLOGY

This study aims to create a system capable of automatically determining the correct class or identity of the fusion image by combining thermal and visible ear images obtained under different lighting conditions using MRA-based methods. In this context, a unique CNN model was designed. This section comprises three separate sub-steps: (1)

Multiresolution analysis methods, (2) Pixel-level fusion of thermal and visible ear images, and (3) the designed convolutional neural network Model and parameters.

Multiresolution analysis methods

The development of wavelets has made Multiresolution Analysis (MRA) methods very popular. MRA methods, operating at various scales, are frequently employed in image processing applications to capture different features of images (Cihan & Ceylan, 2021). By displaying images at different scales, one can easily detect inconspicuous features at various levels (Morlet et al., 1982). In this study, three different MRA methods were used for the fusion of thermal and visible images: discrete wavelet transform, ridgelet transform, and curvelet transform. Due to their diverse capabilities in identifying points, edges, and curves, these methods are often preferred for tasks such as image denoising, object recognition, and image fusion. Moreover, each of these methods offers different levels and versions of transformations.

Discrete wavelet transform (DWT): The Wavelet Transform is among the MRA methods used for the analysis of both stationary and non-stationary signals. It serves as an effective tool in image analysis methods by enabling local analysis through the separation of data into various frequency components. This segmentation allows the examination of large signals in small areas (Cihan & Ceylan, 2021). Figure 1 illustrates the 2D-DWT process involving low-pass and high-pass filter banks. This process yields the low-resolution counterpart of the original image (LL subband), which contains the approximation coefficients, as well as images with detail coefficients (HL, LH, and HH subbands) that convey additional information. The LL subband can be further transformed to achieve higher levels of transformation.

Equation 1 is used to apply WT in discrete form, where i , w_i , s_i , p_i and $\Psi(t)$ are the numbers of the samples, weight coefficients, scales, positions and mother wavelet, respectively.

$$\hat{h}(x) \approx \sum_{i=1}^K w_i \Psi\left(\frac{x-p_i}{s_i}\right) \quad (1)$$

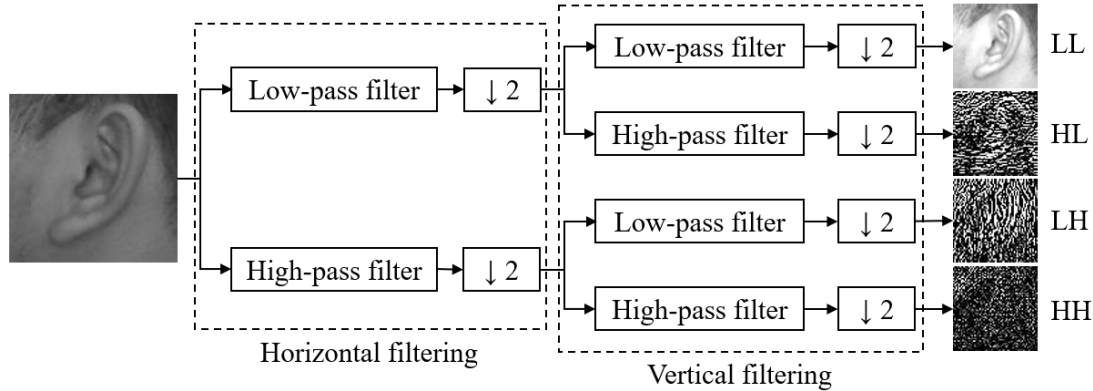


Figure 1. The Decomposition Of A Visible Ear Image Using 2D-DWT Involves A Two-Step Process. Initially, Filter Banks (Comprising Low-Pass And High-Pass Filters) Are Applied Horizontally To The Image. Following This Horizontal Filtering, Subbands Are Generated By Applying Filter Banks Vertically To The Results Obtained In The Previous Step.

Ridgelet transform (RT): Ridgelet transform (RT) offers several advantages over the wavelet transform. While DWT can capture horizontal, vertical, and diagonal components in an image pointwise, it cannot capture linear components and curvilinear structures, such as edges and corners, at various angles. Wavelets struggle to effectively represent objects with highly anisotropic elements due to their limited edge curve regularity and non-geometric nature. In contrast, RT is preferred in many computer vision applications because of its ability to capture linear components at various angles (Rane & Bhadade, 2020; Chen et al., 2021).

When applying RT (the method of choice in image analysis studies), the Ridgelet function (Equation 2) is used. Thanks to the included angle parameter, the Ridgelet function provides a versatile analysis along a straight line. RT is implemented similarly to WT. The RT coefficients of a 2D signal $f(x_1, x_2)$ are obtained from the product of the original signal and the Ridgelet function (Equation 3). In Equation 3, $\Psi(\cdot)$ represents 1B Wavelet function so that

$x = (x_1, x_2) \in R^2$ condition is satisfied. In the same equation, θ ($\theta \in [0, 2\pi)$) is the direction parameter (Do & Vetterli, 2003).

$$\Psi_{a,b,\theta}(x) = a^{-1/2}\Psi((x_1\cos\theta + x_2\sin\theta - b)/a) \quad (2)$$

$$R(a, b, \theta) = \int_{R^2} \Psi_{a,b,\theta}(x)f(x_1, x_2)dx_1dx_2 \quad (3)$$

RT is fundamentally rooted in the Radon transform, which itself relies on the Fourier transform. To derive the Radon transform coefficients of an image, a two-dimensional Fourier transform is initially applied to the image. These coefficients are then interpolated along a straight line. Subsequently, applying a one-dimensional inverse Fourier transform to the interpolated result yields the Radon coefficient. Notably, the Radon transform serves to convert the curves present in an image into point discontinuities. The Radon transform of an image ($f(x, y)$) can also be expressed as follows to show a δ Dirac distribution:

$$P(t, \theta) = \int_{R^2} f(x, y)\delta(x\cos\theta + y\sin\theta - t)dx dy \quad (4)$$

If 1D WT is applied to the Radon coefficients, RT coefficients are reached (Equation 4). The application of RT depending on the Fourier transform is given in Figure 2.

$$R(a, b, \theta) = \int_{R^2} \Psi_{a,b}(t)P(\theta, t)dt \quad (5)$$

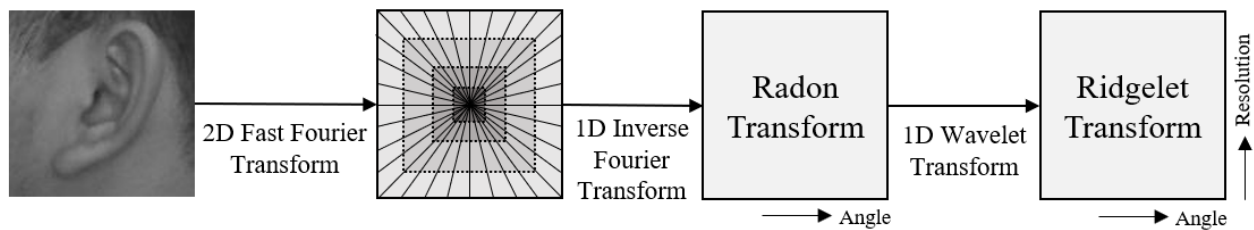


Figure 2. The Ridgelet Transform Flowchart Involves Processing Each Radial Line In The Fourier Domain Individually. First, A 1D Inverse Fast Fourier Transform Is Calculated Along Each Radial Line. Subsequently, The Ridgelet Coefficients Are Derived From The 1D Non-Orthogonal Wavelet Transform.

Curvelet transform (CT): While RT is effective in capturing regions containing edges and linear components in images, it falls short in capturing regions with curvilinear components. To address this limitation, the Curvelet Transform (CT) was developed by Fadili and Starck in 2009.

CT, first introduced by Candes & Donoho (1999) and later revised by Starck et al. (2003), represents a high-dimensional generalization of the WT. This MRA method is specifically designed to represent images at various angles and scales. CT can be visualized as a multi-scale pyramid, with its frame elements indexed based on parameters such as scale, direction, and position. Notably, the curvelet pyramid offers exceptional directional sensitivity and a degree of anisotropy, as demonstrated by AlZubi et al. (2011).

There are two types of CT methods: first-generation CT and second-generation CT. First-generation CT is designed to reduce noise in images but requires more processing time compared to second-generation CT. It has a more complex structure. Conversely, the numerical implementation of second-generation CT is simpler and can be executed in less time with fewer operations (Candes et al., 2006). In this study, second-generation CT was employed using both real and complex values. While real-valued CT provides only amplitude components, complex-valued CT additionally extracts phase components, enhancing its directional selectivity. However, working with complex numbers can introduce greater computational complexity, necessitating more computational resources and processing power. In contrast, real-valued CT, relying solely on real numbers, is known for its simplicity and speed in computations. Complex-valued CT is typically chosen when capturing fine details is critical, especially in tasks like high-resolution image processing and signal analysis. Conversely, real-valued CT is better suited for applications prioritizing efficient and rapid computations. Figure 3 illustrates the schematic of the second-generation CT.

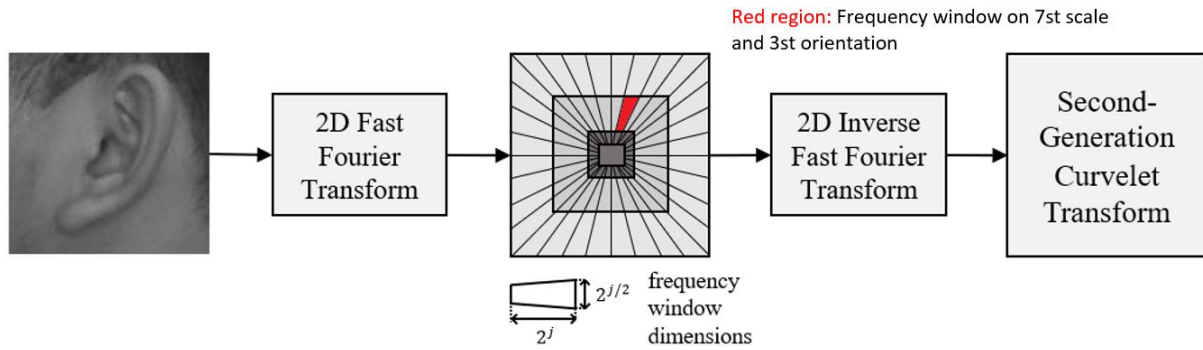


Figure 3. The Flowchart For The Second-Generation Curvelet Transform Involves The Separate Processing Of Frequency Windows Between Radial Lines In The Fourier Domain. Initially, The 2D Inverse Fast Fourier Transform Is Computed For Each Frequency Window, Resulting In The Derivation Of Second-Generation Curvelet Coefficients. These Frequency Windows Can Be Assigned Individual Names, And The Name Of The Frequency Window Within The Red Region Is Highlighted.

Pixel-level fusion of thermal and visible ear images

Image fusion is the process of combining images obtained from different sensors in a way that complements each other's missing aspects. The fusion is based on using datasets containing diverse information for the same data, which can be collected with different sensors or under varying conditions. In computer vision, image fusion is defined as the collection of critical information from multiple images, often resulting in a single, enriched image. The fused image contains more information than any individual input image (Haghighat et al., 2011). Previous studies have explored various techniques, including pixel-level fusion and MRA methods (Pajares & De La Cruz, 2004; Singh et al., 2004).

In this study, it was performed the fusion of thermal and visible ear images using pixel-level fusion in the multi-scale transform (MST) domain. MST-based fusion necessitates the conversion of source images into the MST domain before applying fusion rules. These fusion rules are then applied to the coefficients in the MST domain, resulting in a fused image obtained through inverse transformation. The specific methods employed for MST-based fusion are detailed in the subsection *Multiresolution Analysis Methods*.

In this study, it was used the mean selection rule to combine images after obtaining multi-scale coefficients of the thermal and visible ear images using MRA methods. Given the brightness of the thermal images, it was reasoned that the mean selection rule, as opposed to maximum or minimum rules, would yield more accurate results. In Equation 6, T and V represent the transform coefficients obtained from the thermal and visible images, respectively. The mean rule was applied to each value within the coefficient matrices, resulting in a fused image for each ear instead of two separate images. An example of a DWT-based fusion method is illustrated in Figure 4.

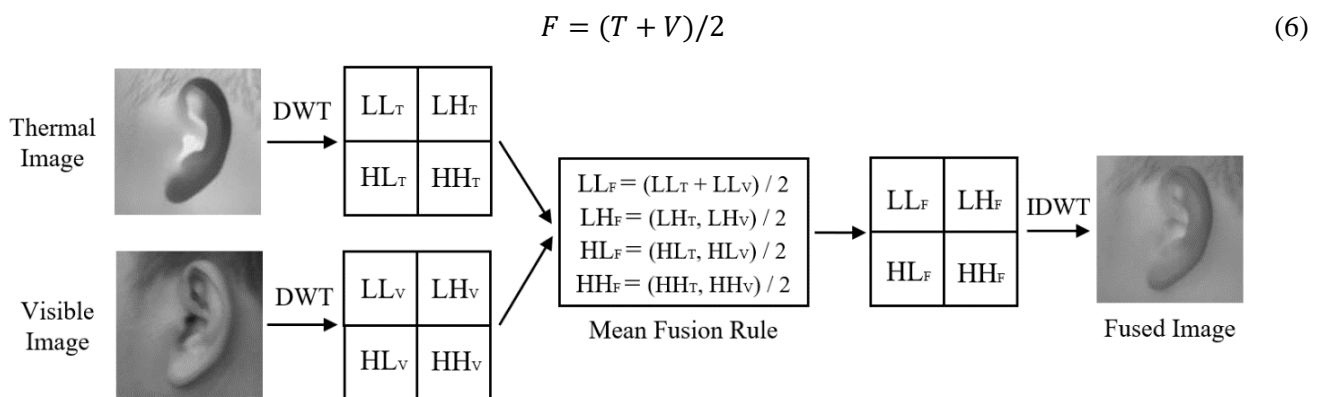


Figure 4. An Example Of A DWT-Based Fusion Method: First, The Coefficients Of The Thermal And Visible Images Is Obtained At Various Scales Using DWT. Next, The Mean Selection Rule To These Coefficients Is Applied. The Mean Selection Rule Is Used To Combine Information From Both Thermal And Visible Images Effectively. Finally, A Fusion Image Is Created By Performing An Inverse DWT On The Processed Coefficients.

The designed convolutional neural network model and parameters

Convolutional Neural Networks (CNNs) are a subset of deep neural networks and represent a specialized version of multilayer perceptrons. They find widespread use in various applications, including image classification (Cihan et al., 2022a), medical image analysis (Yu et al., 2021), image clustering (Guérin et al., 2021), and object recognition (Ashiq et al., 2022). A typical CNN architecture comprises several essential components, including a convolution layer, pooling layer, activation function, and fully connected (FC) layer (Cihan et al., 2022b).

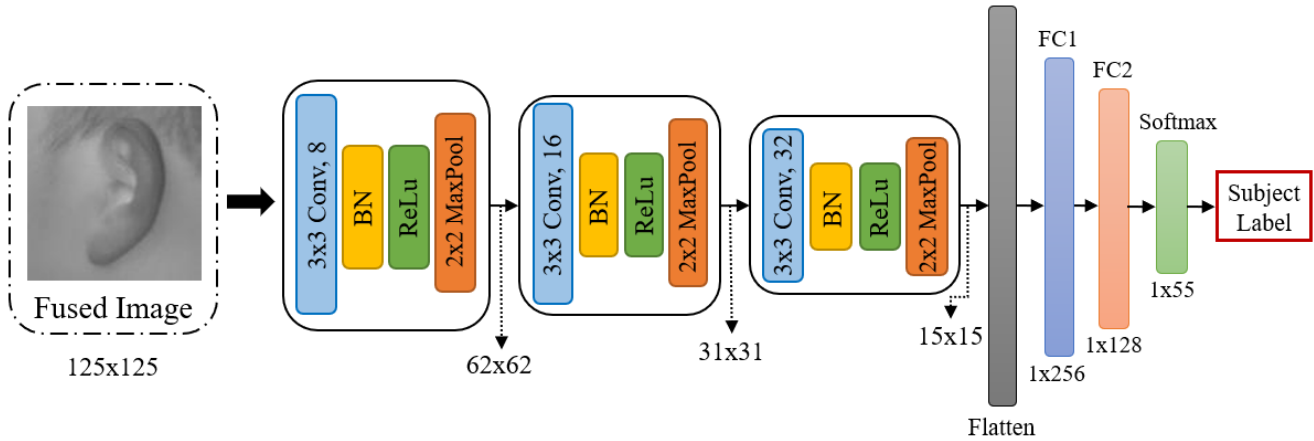


Figure 5. The Designed CNN Model Includes Several Key Components: Conv (Convolution), BN (Batch Normalization), Maxpool (Maximum Pooling), And FC (Fully Connected).

The designed CNN model comprises convolution and pooling layers that change during feature extraction, followed by deep fully connected layers for the final classification stage. Figure 5 illustrates the layer structure of the network, while Table 1 provides details about the parameters of the model. The network begins with three convolution layers. The fused images are fed into the first convolution layer, followed by subsequent layers with 8, 16, and 32 filters, respectively, each with a filter size of 3×3. Batch Normalization (BN) is applied after each convolution layer to enhance speed and stability. After each convolution layer, a 2×2 maximum pooling layer is used to reduce the size of the feature maps. Dropout layers are introduced after the second and third max-pooling layers, with a dropout rate of 0.5. The *ReLU* activation function is applied to each convolution layer. The data are then flattened and transformed into one-dimensional tensors. Three Fully Connected (FC) layers follow this step, with dropout layers introduced after each FC layer to prevent overfitting, each with a dropout rate of 0.4. The first two FC layers contain 256 and 128 neurons, respectively, while the third FC layer, serving as the output layer, consists of 55 neurons (corresponding to the number of classes). Finally, as there are multiple classes in total, the classification is performed using the *softmax* function.

Table 1. Parameters Of The Designed CNN Model.

Layer (type)	Output Shape	Parameter
input_1 (InputLayer)	(125, 125, 1)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(123, 123, 8)	80
BN_1	(123, 123, 8)	32
max_pooling2d_1	(61, 61, 8)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(59, 59, 16)	1168
BN_2	(59, 59, 16)	64
max_pooling2d_2	(29, 29, 16)	0
dropout_1 (Dropout)	(29, 29, 16)	0
conv2d_3 (Conv2D)	(27, 27, 32)	4640
BN_3	(27, 27, 32)	128
max_pooling2d_3	(13, 13, 32)	0
dropout_2 (Dropout)	(13, 13, 32)	0
flatten_1 (Flatten)	5408	0
fc_1 (FC)	256	1384704
dropout_3 (Dropout)	256	0
fc_2 (FC)	128	32896
dropout_4 (Dropout)	128	0
fc_3 (FC)	55	7095
Total parameters: 1,430,807		

EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

In this section, the dataset used is first introduced. It is then merged thermal and visible ear images using the MRA-based fusion methods described in the previous section. Subsequently, it is employed the resulting fusion images to train the designed CNN model. The experimental outcomes and findings are then presented and discussed.

Dataset

In this study, it was used the DIAST dataset, which includes both thermal and visible ear images, as detailed by Ariffin et al. (2016). This dataset comprises a total of 2200 ear images, representing 55 different individuals. Specifically, the dataset consists of 1100 thermal images and 1100 visible images. Each individual's ear images were acquired separately for the left and right ears. The raw images in the dataset are grayscale and stored in jpg format, with a spatial size of 125x125 pixels. What sets this dataset apart is that images for each individual were captured under five distinct illumination levels, spanning a wide range of light intensities from 2 lux to 10700 lux. These images are categorized into three lighting conditions based on their lux values: 'dark' for lux values ranging from 0 to 20, 'average' for lux values between 21 and 100, and 'bright' for lux values exceeding 100. To provide a visual representation, Figure 6 showcases example images obtained under different illumination levels.

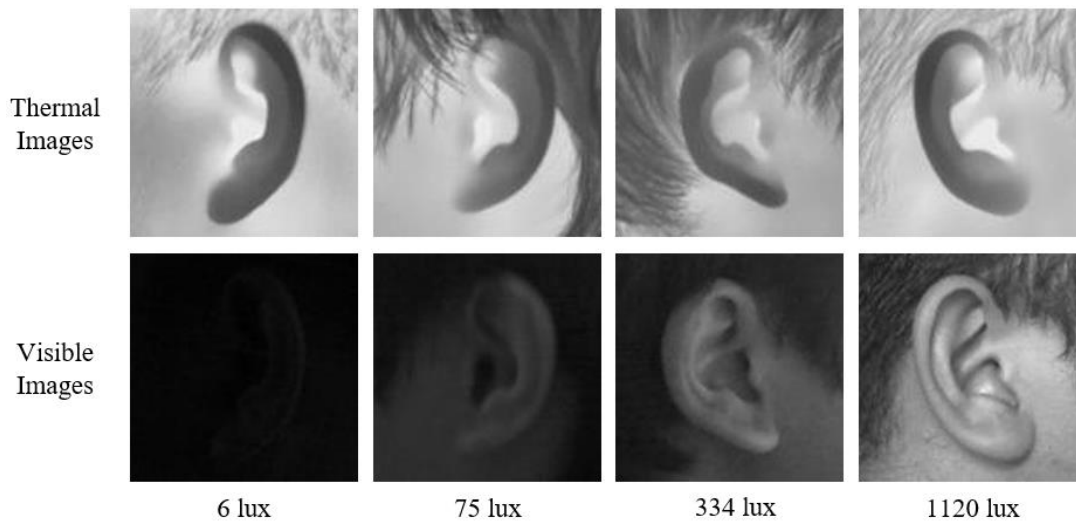


Figure 6. The Examples Of Thermal And Visible Ear Images At Different Illumination Levels In The DIAST Dataset.

Performance metrics and protocols

In this experiment, fusion images obtained through MRA methods were used for an identification task, and the results were evaluated using the designed CNN model. The dataset, comprising images captured at different illumination levels, was used to train the network, with the goal of assigning test images to one of the 55 available classes. The primary performance metric used in this study was the recognition rate, which calculates the ratio of correctly predicted data to the total number of data.

For the experiment, an 80%-20% split was employed, with 80% of the total data used for training and the remaining 20% for testing. To enhance model reliability and detect overfitting, 5-fold cross-validation was performed during training. The CNN model was trained with a batch size of 6 over 200 epochs.

Results and discussions

In this experiment, thermal and visible images captured under the same illumination conditions were combined using MRA methods. Each MRA method created 1100 fusion images, evenly distributed between right and left ears. Separate and joint recognitions were performed for the right and left ears. Figure 7 provides visual examples of fusion images obtained using different MRA methods, with a total of three MRA methods used in this study. These included 2-level and 3-level DWT fusion and RT fusion as well as real-valued CT (RCT) and complex-valued CT (CCT) fusion for second-generation CT.

Image features were automatically extracted using the convolution and maximum pooling layers within the CNN model. Ten images from each subject (either right or left ear) were available under varying illumination levels. Eight of these images per subject were used for training, resulting in a total of 440 training images. The remaining two images from each subject were reserved for testing, totaling 110 testing images. To ensure robustness and reliability, 5-fold cross-validation was employed, using images from all illumination levels for both training and testing. The same number of ear images was sampled from both the right and left ears.

The experimental results are summarized in Table 2. Notably, visible images achieved the lowest recognition rate at 75.00%, which can be attributed to the challenges posed by poorly illuminated images that hinder accurate feature extraction. Upon reviewing all results, the highest recognition rate of 96.82% was achieved using CCT with thermal images. Thermal images demonstrated superior recognition rates due to their consistent representations across different lighting conditions.

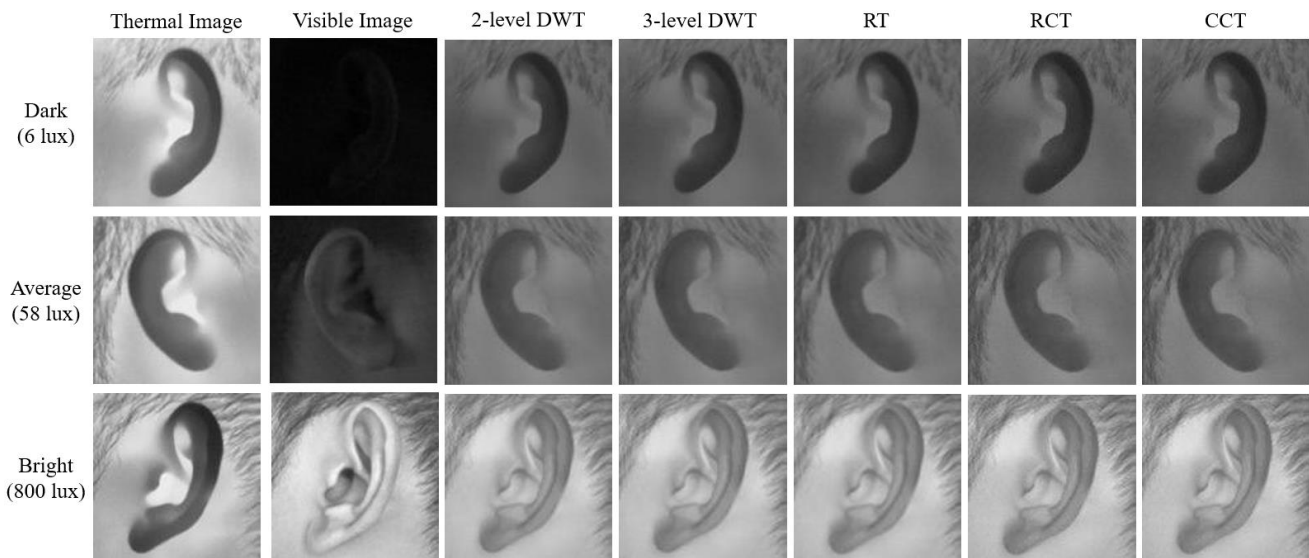


Figure 7. Original Thermal And Visible Images For Three Different Illumination Levels And Fusion Images Obtained Using Different MRA Methods.

Table 2. Experimental Results Including Recognition Of Ear Images Obtained Using Different Imaging Modalities And Pixel-Level Fusion With The Designed CNN Model. The Best Performances Are Marked In Bold.

Image Modalities	Recognition Rate (%)		
	Right	Left	Both
Visible	74.55	75.46	75.00
Thermal	97.27	96.36	96.82
2-level DWT	93.64	95.46	94.55
3-level DWT	95.46	96.36	95.91
RT	91.82	96.36	94.09
RCT	95.46	96.36	95.91
CCT	96.36	97.27	96.82

Figure 8 illustrates the model's loss and accuracy for the two most successful methods. When considering the use of thermal images, the model was trained in a shorter time compared to the CCT method. However, a closer look at test accuracy reveals that the CCT model achieves impressive results within a shorter training duration. This can be attributed to the incorporation of valuable textural information from visible images into the composite image after fusion. These graphs clearly show a simultaneous increase in model accuracy alongside a decrease in model losses for both methods. Importantly, there is no evidence of underfitting or overfitting, except in cases related to the recognition rate observed during cross-validation.

Extracting low-level features, particularly texture, from visible ear images captured under dark lighting conditions presents a significant challenge. The lack of distinctive features in these dark images hinders the fusion process, as they fail to complement the information from thermal images effectively. The experimental results in Table 2 confirm

that the deficiencies in features obtained from dark images negatively impacted the quality of fusion images, resulting in a decrease in the recognition rate.

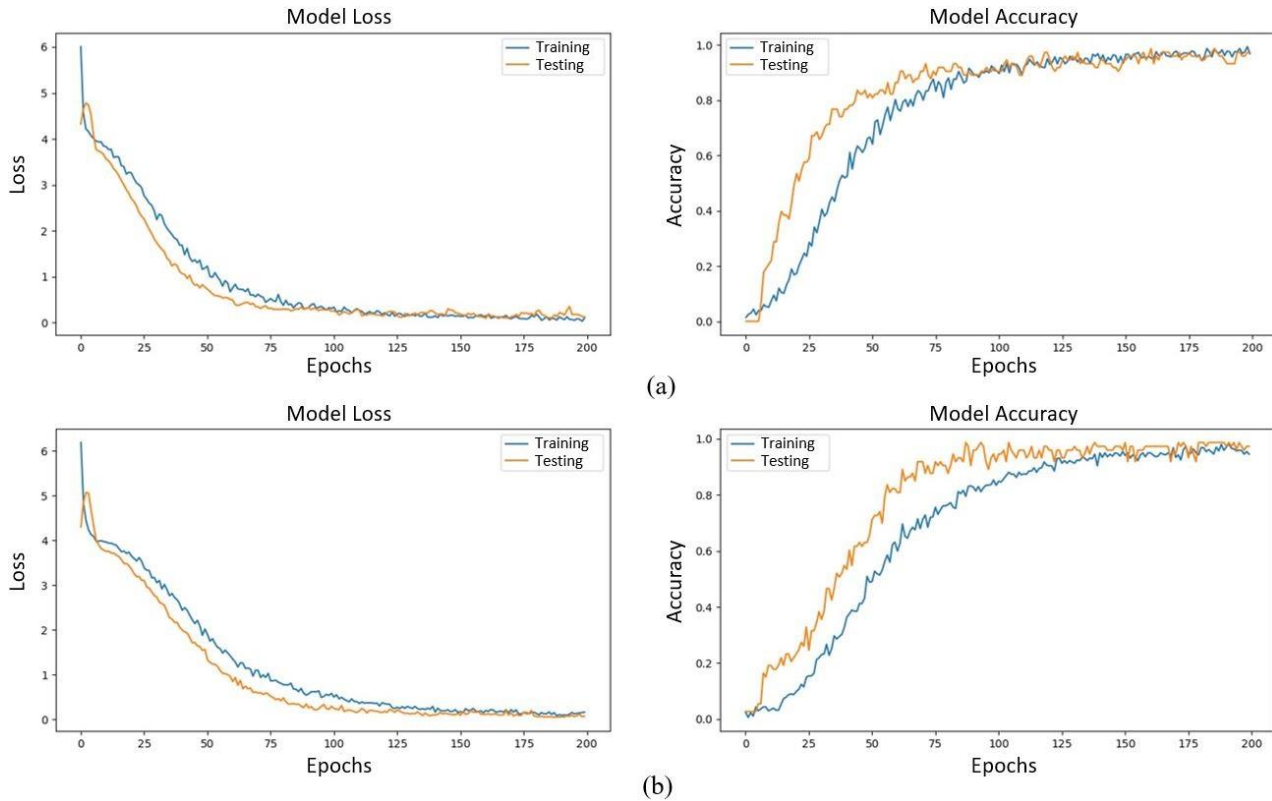


Figure 8. Model Losses And Accuracies **a.** Thermal Images **b.** CCT.

The proposed model has delivered remarkably successful results. With a total of six layers, including three convolution layers and three fully connected layers, this model showcases high-performance capabilities while maintaining a significantly reduced parameter count in comparison to established deep learning architectures such as VGG, AlexNet, ResNet, and others. The exceptional performance achieved by the proposed method eliminates the need for off-the-shelf architectures, emphasizing the effectiveness of this approach.

CONCLUSION AND FURTHER STUDY

The performances obtained through the mean fusion rule, employing three MRA methods (DWT, RT, CT), were compared in the proposed ear recognition system. Additionally, the effects of thermal and visible images on performance under different illumination conditions were evaluated. Subsequently, the obtained results are presented as follows:

- Thermal imaging remains unaffected by illumination variations but tends to struggle in capturing texture properties. Conversely, well-illuminated visible images excel at capturing textures. To leverage the strengths of both imaging modalities without sacrificing information, appropriate fusion techniques are employed. This fusion combines the distinctive features of thermal and visible images, resulting in successful outcomes.
- When dark images are used during the CNN model training, visible images exhibit lower recognition performance compared to thermal and fusion images.
- CCT stands out as the most efficient MRA method for ear recognition, as evident from the recognition rates. CCT's ability to effectively capture directional selectivity in ear images using both phase and amplitude information contributes to its superior performance. Thermal images yield the best results for the right ear, while CCT achieves the highest recognition rate for the left ear. Additionally, RCT and 3-level DWT demonstrate high recognition rates for both the right and left ears. These results underscore the enhancement of ear recognition through the fusion process. However, it's worth noting that there is no single optimal fusion technique for ear recognition.

This study worked with a limited dataset of ear data, yet our results showcase the potent application of deep learning and image fusion techniques even within data-limited domains. These methodologies empower us to achieve high-quality results, overcoming the constraints posed by limited data. Furthermore, they establish a crucial foundation for future research in this domain. The findings from this study offer valuable inspiration for all fields confronted with data limitations.

In further studies, expanding the dataset and training the CNN model with more data would be beneficial. Additionally, it would be valuable to compare results using CNN architectures like AlexNet, VGG, and SqueezeNet. Given the limited dataset size, the application of pre-trained models for transfer learning holds the potential to yield faster and more effective results in further research. Furthermore, exploring different fusion methods and fusion rules for evaluations could provide valuable insights.

REFERENCES

- Abaza, A., & Bourlai, T. (2012, May). Human ear detection in the thermal infrared spectrum. *In Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*, 8354, 286-295. <https://doi.org/10.1117/12.919285>
- Abd Almisreb, A., Jamil, N., & Din, N. M. (2018, March). Utilizing AlexNet deep transfer learning for ear recognition. *In 2018 Fourth International Conference on Information Retrieval and Knowledge Management (CAMP)*, 1-5. DOI: 10.1109/INFRKM.2018.8464769
- Alshazly, H., Linse, C., Barth, E., & Martinetz, T. (2019). Handcrafted versus CNN features for ear recognition. *Symmetry*, 11(12), 1493. <https://doi.org/10.3390/sym11121493>
- AlZubi, S., Sharif, M. S., Islam, N., & Abbod, M. (2011, May). Multi-resolution analysis using curvelet and wavelet transforms for medical imaging. *In 2011 IEEE international symposium on medical measurements and applications*, 188-191. DOI: 10.1109/MeMeA.2011.5966687
- Ariffin, S. M. Z. S. Z., Jamil, N., & Rahman, P. N. M. A. (2016, September). DIAST variability illuminated thermal and visible ear images datasets. *In 2016 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, 191-195. DOI: 10.1109/SPA.2016.7763611
- Ariffin, S. M. Z. S. Z., Jamil, N., & Rahman, P. N. M. A. (2017, May). Can thermal and visible image fusion improves ear recognition?. *In 2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, 780-784. DOI: 10.1109/ICITECH.2017.8079945
- Ashiq, F., Asif, M., Ahmad, M. B., Zafar, S., Masood, K., Mahmood, T., Mahmood, M. T., & Lee, I. H. (2022). CNN-based object recognition and tracking system to assist visually impaired people. *IEEE Access*, 10, 14819-14834. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3148036
- Benzaoui, A., Kheider, A., & Boukrouche, A. (2015, October). Ear description and recognition using ELBP and wavelets. *In 2015 International Conference on Applied Research In Computer Science And Engineering (Icar)*, 1-6. DOI: 10.1109/ARCSE.2015.7338146
- Bertillon, A., & McClaughry, R. W. (1896). Signaletic instructions including the theory and practice of anthropometrical identification. *Werner Company*.
- Candès, E. J., & Donoho, D. L. (1999). Ridgelets: A key to higher-dimensional intermittency?. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 357(1760), 2495-2509. <https://doi.org/10.1098/rsta.1999.0444>
- Candes, E., Demanet, L., Donoho, D., & Ying, L. (2006). Fast discrete curvelet transforms. *Multiscale Modeling & Simulation*, 5(3), 861-899. <https://doi.org/10.1137/05064182>
- Chen, D., Tang, J., Xi, H., & Zhao, X. (2021). Image Recognition of Modern Agricultural Fruit Maturity Based on Internet of Things. *Traitement du Signal*, 38(4). DOI: 10.18280/ts.380435
- Choi, J., Hu, S., Young, S. S., & Davis, L. S. (2012, May). Thermal to visible face recognition. *In Sensing Technologies for Global Health, Military Medicine, Disaster Response, and Environmental Monitoring II; and Biometric Technology for Human Identification IX*, 8371, 252-261. <https://doi.org/10.1117/12.920330>

- Cihan, M., & Ceylan, M. (2021). Fusion of CT and MR Liver Images Using Multiresolution Analysis Methods. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (30), 56-61. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1005858>
- Cihan, M., Ceylan, M., & Ornek, A. H. (2022a). Spectral-spatial classification for non-invasive health status detection of neonates using hyperspectral imaging and deep convolutional neural networks. *Spectroscopy Letters*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/00387010.2022.2076698>
- Cihan, M., Ceylan, M., Soylu, H., & Konak, M. (2022b). Fast Evaluation of Unhealthy and Healthy Neonates Using Hyperspectral Features on 700-850 Nm Wavelengths, ROI Extraction, and 3D-CNN. *IRBM*, 43(5), 362-371. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2021.06.009>
- Ciresan, D. C., Meier, U., Masci, J., Gambardella, L. M., & Schmidhuber, J. (2011, June). Flexible, high performance convolutional neural networks for image classification. In *Twenty-second international joint conference on artificial intelligence*. DOI: 10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-210
- Do, M. N., & Vetterli, M. (2003). The finite ridgelet transform for image representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 12(1), 16-28. DOI: 10.1109/TIP.2002.806252
- El-Naggar, S., & Bourlai, T. (2022). Exploring Deep Learning Ear Recognition in Thermal Images. *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, 5(1), 64-75. DOI: 10.1109/TBIOM.2022.3218151
- Emeršič, Ž., Štepec, D., Štruc, V., & Peer, P. (2017). Training convolutional neural networks with limited training data for ear recognition in the wild. arXiv preprint arXiv:1711.09952. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.09952>
- Emeršič, Ž., Štruc, V., & Peer, P. (2017). Ear recognition: More than a survey. *Neurocomputing*, 255, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.08.139>
- Fadili, J. M., & Starck, J. L. (2009). Curvelets and ridgelets. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_111
- Fields, C., Falls, H. C., Warren, C. P., & Zimberoff, M. (1960). The ear of the newborn as an identification constant. *Obstetrics & Gynecology*, 16(1), 98-102.
- Galdámez, P. L., Raveane, W., & Arrieta, A. G. (2017). A brief review of the ear recognition process using deep neural networks. *Journal of Applied Logic*, 24, 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jal.2016.11.014>
- Guérin, J., Thiery, S., Nyiri, E., Gibaru, O., & Boots, B. (2021). Combining pretrained CNN feature extractors to enhance clustering of complex natural images. *Neurocomputing*, 423, 551-571. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.10.068>
- Gutiérrez, L., Melin, P., & Lopez, M. (2010, July). Modular neural network integrator for human recognition from ear images. In *The 2010 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1-5. DOI: 10.1109/IJCNN.2010.5596633
- Haghighat, M. B. A., Aghagolzadeh, A., & Seyedarabi, H. (2011). Multi-focus image fusion for visual sensor networks in DCT domain. *Computers & Electrical Engineering*, 37(5), 789-797. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2011.04.016>
- Jain, A. K., Flynn, P., & Ross, A. A. (Eds.). (2007). Handbook of biometrics. *Springer Science & Business Media*.
- Jamil, N., AlMisreb, A., & Halin, A. A. (2014). Illumination-invariant ear authentication. *Procedia Computer Science*, 42, 271-278. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.11.062>
- Kong, S. G., Heo, J., Boughorbel, F., Zheng, Y., Abidi, B. R., Koschan, A., Yi, M., & Abidi, M. A. (2007). Multiscale fusion of visible and thermal IR images for illumination-invariant face recognition. *International Journal of Computer Vision*, 71(2), 215-233. <https://doi.org/10.1007/s11263-006-6655-0>
- Lannarelli, A. (1989). Ear identification. *Forensic identification series*.
- Ma, Y., Huang, Z., Wang, X., & Huang, K. (2020). An overview of multimodal biometrics using the face and ear. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6802905>
- Maity, S., Abdel-Mottaleb, M., & Asfour, S. S. (2020). Multimodal biometrics recognition from facial video with missing modalities using deep learning. *Journal of Information Processing Systems*, 16(1), 6-29. DOI: 10.3745/JIPS.02.0129

- Moreno, B., Sanchez, A., & Vélez, J. F. (1999, October). On the use of outer ear images for personal identification in security applications. *In Proceedings IEEE 33rd Annual 1999 International Carnahan Conference on Security Technology (Cat. No. 99CH36303)*, 469-476. DOI: 10.1109/CCST.1999.797956
- Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E., & Glard, D. (1982). Wave propagation and sampling theory—Part I: Complex signal and scattering in multilayered media. *Geophysics*, 47(2), 203-221. <https://doi.org/10.1190/1.1441328>
- Nejati, H., Zhang, L., Sim, T., Martinez-Marroquin, E., & Dong, G. (2012, November). Wonder ears: Identification of identical twins from ear images. *In Proceedings of the 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR2012)*, 1201-1204.
- Pajares, G., & De La Cruz, J. M. (2004). A wavelet-based image fusion tutorial. *Pattern recognition*, 37(9), 1855-1872. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2004.03.010>
- Pflug, A., Paul, P. N., & Busch, C. (2014, October). A comparative study on texture and surface descriptors for ear biometrics. *In 2014 International carnahan conference on security technology (ICCST)*, 1-6. DOI: 10.1109/CCST.2014.6986993
- Rane, M. E., & Bhadade, U. (2020, December). Face and palmprint Biometric recognition by using weighted score fusion technique. *In 2020 IEEE Pune Section International Conference (PuneCon)*, 11-16. DOI: 10.1109/PuneCon50868.2020.9362433
- Sarangi, P. P., Mishra, B. P., & Dehuri, S. (2018, March). Multimodal biometric recognition using human ear and profile face. *In 2018 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 1-6. DOI: 10.1109/RAIT.2018.8389035
- Sarangi, P. P., Nayak, D. R., Panda, M., & Majhi, B. (2022). A feature-level fusion based improved multimodal biometric recognition system using ear and profile face. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(4), 1867-1898. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-02952-0>
- Seal, A., Bhattacharjee, D., Nasipuri, M., Gonzalo-Martin, C., & Menasalvas, E. (2017). Fusion of visible and thermal images using a directed search method for face recognition. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 31(04), 1756005. <https://doi.org/10.1142/S0218001417560055>
- Singh, S., Gyaourova, A., Bebis, G., & Pavlidis, I. (2004, August). Infrared and visible image fusion for face recognition. *In Biometric technology for human identification*, 5404, 585-596. <https://doi.org/10.1117/12.543549>
- Starck, J. L., Donoho, D. L., & Candès, E. J. (2003). Astronomical image representation by the curvelet transform. *Astronomy & Astrophysics*, 398(2), 785-800. DOI: 10.1051/0004-6361:20021571
- Toygar, Ö., Alqaralleh, E., & Afaneh, A. (2018). Person identification using multimodal biometrics under different challenges. *Human-Robot Interaction-Theory and Application*, 81-96. DOI: 10.5772/intechopen.71667
- Victor, B., Bowyer, K., & Sarkar, S. (2002, August). An evaluation of face and ear biometrics. *In 2002 International Conference on Pattern Recognition*, 1, 429-432. DOI: 10.1109/ICPR.2002.1044746
- Yu, H., Yang, L. T., Zhang, Q., Armstrong, D., & Deen, M. J. (2021). Convolutional neural networks for medical image analysis: state-of-the-art, comparisons, improvement and perspectives. *Neurocomputing*, 444, 92-110. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.04.157>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.08.2023
Kabul Tarihi : 24.10.2023

Received Date : 21.08.2023
Accepted Date : 24.10.2023

COLLOCATION METHOD APPLIED TO NUMERICAL SOLUTION OF INTEGRO-DIFFERENTIAL EQUATIONS

İNTEGRO-DİFERANSİYEL DENKLEMLERİN SAYISAL ÇÖZÜMÜNE UYGULANAN KOLLOKASYON YÖNTEMİ

Birkan DURAK^{1*} (ORCID: 0000-0002-8196-5407)
*Aziz SEZGİN*² (ORCID: 0000-0001-6861-5309)
*Hasan Ömür ÖZER*³ (ORCID: 0000-0002-6388-4638)
*Lütfi Emir SAKMAN*² (ORCID: 0000-0002-9599-8875)
*Şule KAPKIN*² (ORCID: 0000-0003-4951-7089)

¹ Istanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Istanbul, Türkiye

² Istanbul University-Cerrahpaşa, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye

³ Istanbul University-Cerrahpaşa, Vocational School of Technical Sciences, Department of Electricity and Energy, Istanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Birkan DURAK, birkand@iuc.edu.tr

ABSTRACT

Integro-differential equations are encountered in such fields of study as mechanics, physics, chemistry, biophysics, astronomy, economic theory, and population dynamics. In rare cases the solution methods for differential and/or integral equations can be generalized to integro-differential equations; but in general, numerical methods have to be applied. Recent years have seen the development of a large number of methods applicable to integro-differential equations. The present study aims to compare these newer methods with the classical method of point collocation, which is one of the weighted residual methods. The method was applied to test problems chosen from the literature, both linear and nonlinear integro-differential equations, and was seen to give good results.

Keywords: Collocation method, nonlinear integro-differential equations, Volterra integro-differential equation, Fredholm integro-differential equations, numerical solution.

ÖZET

İntegro-diferansiyel denklemler mekanik, fizik, kimya, biyofizik, astronomi, ekonomi teorisi ve nüfus dinamiği gibi çalışma alanlarında karşımıza çıkmaktadır. Nadir durumlarda diferansiyel ve/veya integral denklemlerin çözüm yöntemleri integro-diferansiyel denklemlere genelleştirilebilir; ancak genel olarak sayısal yöntemlerin uygulanması gerekir. Son yıllarda integro-diferansiyel denklemlere uygulanabilen çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışma, bu yeni yöntemleri, ağırlıklı kalıntı yöntemlerinden biri olan klasik nokta kollokasyon yöntemi ile karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Yöntem, literatürden seçilen doğrusal ve doğrusal olmayan integro-diferansiyel denklemlerden oluşan test problemlerine uygulanmış ve iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kollokasyon yöntemi, doğrusal olmayan integro-diferansiyel denklemler, Volterra integro-diferansiyel denklemi, Fredholm integro-diferansiyel denklemleri, sayısal çözüm.

INTRODUCTION

The first step in solving physics and engineering problems is the development of a physical-mathematical model of the problem. This leads to various types of equations which are classified according to the methods developed to solve them.

An integro-differential equation roughly is an equation that includes both the derivatives and the integrals of an unknown function $u(x)$ to be solved. Integro-differential equations are encountered in a wide range of problems including physics and engineering, biomechanics, geophysics, electricity and magnetism, etc.

The works of Abel, Lotka, Fredholm, Malthus, Verhulst and Volterra developed general theories of integral and integro-differential equations (Lakshmikantham & Rao, 1995). However, the class of analytically solvable equations is quite limited and numerical solution methods often have to be applied. In recent years a number of novel numerical methods have been applied for the solution of integro-differential equations to model problems.

Some of these are: Modified Adomian Decomposition Method (MADM) (Olayiwola & Kareem, 2022), Finite Difference (Çakır & Güneş, 2022; Çimen & Enterili, 2020), Romberg extrapolation algorithm (REA) (Al-Towaiq & Kasasbeh, 2017), Parameterization Method (Dzhumabaev, 2016), Chebyshev Polynomials Method (Boonklurb et al., 2020, Sakran, 2019), Explicit Methods (Abdi, 2022), Multistep Runge-Kutta methods (Wen & Huang, 2024), Least squares method and the second kind Chebyshev wavelets (Ahmadinia et al., 2023).

In the next sections, test problems solved by these newer methods taken from literature will be solved by the collocation method and the results will be interpreted in terms of both effort and solution accuracy.

MATERIAL AND METHODS

A general integro-differential equation involving a single-variable unknown function $u(x)$ can be written as

$$u^n(x) = F[x, u(x), u'(x), \dots, u^{(n-1)}(x)] + \int_a^x K[x, t, u(t), u'(t), \dots, u^{(n)}(x)] dt, \quad a \geq 0 \quad (1)$$

F and K (called kernel) are given functions, and the equation is nonlinear if one of F or K is nonlinear. The type in which the upper limit of the integral is variable (the case here) is called a Volterra type equation. If the upper limit is a constant, this is called a Fredholm type equation.

The collocation method is widely applicable and stands out due to its simplicity. The main steps in applying the collocation method to any problem (including integro-differential equations) can be summarized as follows:

1. A polynomial form of approximate solution with unknown coefficients is suggested.
2. The approximate solution is substituted in the equation and the “residual” is evaluated.
3. Collocation points, including the boundary points, are chosen within the solution domain whose number totals the number of unknown coefficients.
4. The residual is evaluated at the collocation points and the results are equated to zero; this gives an algebraic system of equations.
5. Solving the algebraic system gives the unknown coefficients.

First example: Linear Volterra integro-differential equation

The linear Volterra integro-differential equation

$$u'(x) = 1 - \int_0^x u(t)dt, \quad x \geq 0 \quad u(0) = 0 \quad (2)$$

was solved using Improved Runge-Kutta Methods by Rabiei et al. (2019). For this problem the exact solution is $u(x) = \sin(x)$. Here, the approximate solution will be taken as

$$u(x) = \sum_{n=1}^5 C_n x^n \quad (3)$$

Substituting (3) into (2), the residual is

$$R(x) = u'(x) - 1 + \int_0^x (\sum_{n=1}^5 C_n t^n) dt \tag{4}$$

carrying out the derivative and integral gives

$$R(x) = -1 + C_1 + \frac{x^2 C_1}{2} + 2x C_2 + \frac{x^3 C_2}{3} + 3x^2 C_3 + \frac{x^4 C_3}{4} + 4x^3 C_4 + \frac{x^5 C_4}{5} + 5x^4 C_5 + \frac{x^6 C_5}{6} \tag{5}$$

There are N = 5 unknown coefficients; accordingly, the collocation points are chosen as.

$$x_i = \frac{1}{N+1} i \quad , (i = 1,2,3,4,5) \tag{6}$$

Residual is made zero at these points

$$R(x_i) = 0 \tag{7}$$

This gives a linear system of five equations for the unknown coefficients; in matrix form

$$\begin{bmatrix} 1.0041 & 0.1820 & 0.0248 & 0.0030 & 0.0003 \\ 1.0165 & 0.3656 & 0.099 & 0.0240 & 0.0054 \\ 1.0371 & 0.5522 & 0.2245 & 0.0814 & 0.0277 \\ 1.0661 & 0.7433 & 0.4010 & 0.1936 & 0.0878 \\ 1.1033 & 0.9403 & 0.6305 & 0.3795 & 0.2149 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

and solving this system gives

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.9999986023769859, \\ C_2 &= 0.000017054191493587497 \\ C_3 &= -0.16676379652937337 \\ C_4 &= 0.0002715464065127452 \\ C_5 &= 0.008014287236481989 \end{aligned}$$

The approximate solution becomes

$$u(x) = 0.00801429x^5 + 0.000271546x^4 - 0.166764x^3 + 0.0000170542x^2 + 0.999999x \tag{9}$$

The solution was also found for N=10 and N=15 the exact solution together with approximate solutions and error values are presented in Table 1.

Table 1. Collocation solution and absolute errors for linear Volterra equation

x	Exact Solution	Approximate solution values			Absolute Errors		
		N=5	N=10	N=15	N=5	N=10	N=15
0.0	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
0.1	0.099833	0.099806	0.099833	0.099833	2.66x10 ⁻⁵	8.74x10 ⁻¹³	9.06x10 ⁻¹⁵
0.2	0.198669	0.198634	0.198669	0.198669	3.55x10 ⁻⁵	8.44x10 ⁻¹³	8.99x10 ⁻¹⁵
0.3	0.295520	0.295483	0.295520	0.295520	3.68x10 ⁻⁵	8.27x10 ⁻¹³	8.82x10 ⁻¹⁵
0.4	0.389418	0.389383	0.389418	0.389418	3.58x10 ⁻⁵	7.98x10 ⁻¹³	8.49x10 ⁻¹⁵
0.5	0.479426	0.479391	0.479426	0.479426	3.43x10 ⁻⁵	7.62x10 ⁻¹³	8.16x10 ⁻¹⁵
0.6	0.564642	0.564610	0.564642	0.564642	3.26x10 ⁻⁵	7.19x10 ⁻¹³	7.77x10 ⁻¹⁵
0.7	0.644218	0.644187	0.644218	0.644218	3.06x10 ⁻⁵	6.68x10 ⁻¹³	7.21x10 ⁻¹⁵
0.8	0.717356	0.717328	0.717356	0.717356	2.81x10 ⁻⁵	6.13x10 ⁻¹³	6.55x10 ⁻¹⁵
0.9	0.783327	0.783301	0.783327	0.783327	2.56x10 ⁻⁵	5.31x10 ⁻¹³	5.99x10 ⁻¹⁵
1.0	0.841471	0.841448	0.841471	0.841471	2.29x10 ⁻⁵	1.29x10 ⁻¹²	1.09x10 ⁻¹⁴

Second example: Linear Volterra integro-differential equation

We consider the problem

$$\begin{aligned}
 u'(x) &= \int_0^x x(1 + 2x)e^{t(x-t)}u(t)dt - u(x) + 1 + 2x \\
 u(0) &= 1, \quad 0 \leq x \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Zarebnia (2010) suggested the Sinc collocation method to solve this problem. The exact solution is e^{x^2} . Noting that $u(0) = 1$, the approximate solution is taken as

$$u(x) = 1 + \sum_{n=1}^{10} C_n x^n
 \tag{11}$$

Again, the residual is evaluated and set equal to zero at equally-spaced collocation points. The resulting approximate solutions for N=10, 15 and 20 are

$$\begin{aligned}
 u_{10}(x) &= 0.0512657x^{10} - 0.152106x^9 + 0.29629x^8 - 0.254586x^7 + 0.33159x^6 - 0.0713121x^5 + \\
 &\quad 0.520591x^4 - 0.00387115x^3 + 1.00045x^2 - 0.000027284x + 1 \\
 u_{15}(x) &= 0.000710335x^{15} - 0.0034912x^{14} + 0.0098353x^{13} - 0.0152694x^{12} + 0.0196096x^{11} - \\
 &\quad 0.00846689x^{10} + 0.0107384x^9 + 0.0364841x^8 + 0.00189345x^7 + 0.166146x^6 + \\
 &\quad 0.000106283x^5 + 0.499984x^4 + 1.60908x10^{-6} x^3 + x^2 + 3.97833x10^{-9}x + 1 \\
 u_{20}(x) &= 4.66036x10^{-6} x^{20} - 0.0000241039x^{19} + 0.0000358925x^{18} + 0.000124398x^{17} - \\
 &\quad 0.000669626x^{16} + 0.0017409x^{15} - 0.000252207x^{14} + 0.0031339x^{13} - 0.00133798x^{12} + \\
 &\quad 0.00183359x^{11} + 0.0073663x^{10} + 0.000400867x^9 + 0.0415361x^8 + 0.0000331973x^7 + \\
 &\quad 0.16666x^6 + 9.63854x10^{-7}x^5 + 0.5x^4 + 7.99329x10^{-9} x^3 + x^2 + 1.12238x10^{-11}x + 1
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Figure 1 compares approximate (N=10) and analytic solutions, and Table 2 gives the maximum errors in the approximate solutions.

Table 2. Maximum absolute errors for different collocation point selections of the solution of Eq. (10)

Collocation solutions			
Sinc collocation			
Method	N = 10	N = 15	N=20
(h=0.3141)			
$9.3x10^{-13}$	$1x10^{-6}$	$5x10^{-11}$	$1x10^{-13}$

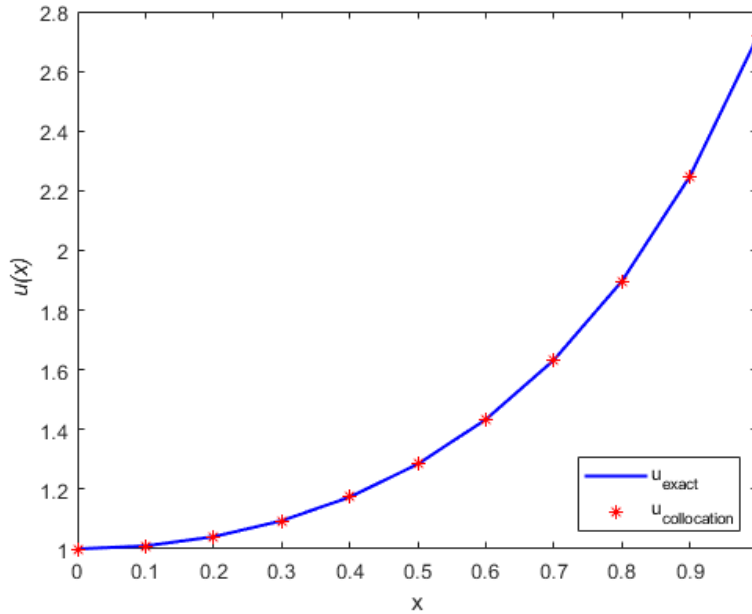


Figure 1. Analytical Solution and Approximate Solution for Ten Collocation Point of Linear Volterra Integro-Differential Equation

Third example: Linear Fredholm integro-differential equation

The problem

$$u'(x) = u(x) - \frac{1}{2}x + \frac{1}{x+1} - \ln(1+x) + \frac{1}{(\ln 2)^2} \int_0^1 \frac{x}{1+t} u(t) dt$$

$$u(0) = 0$$
(13)

was solved using Homotopy Analysis Method by Jaradat et al. (2008); the exact solution is $\ln(1+x)$. The approximate solution is taken as

$$u(x) = \sum_{n=1}^{10} C_n x^n$$
(14)

and this results in

$$u(x) = -0.00201698x^{10} + 0.0134619x^9 - 0.0427269x^8 + 0.0882951x^7 - 0.139456x^6 + 0.190119x^5 - 0.24747x^4 + 0.332896x^3 - 0.499952x^2 + 0.999997x$$
(15)

Table 3 gives absolute errors at various points within the solution domain.

Table 3. Absolute errors for approximate solution of Linear Fredholm integro-differential equation

x	Homotopy Analysis Method			Collocation
	$ E_{HAM}^{10} $	$ E_{HAM}^{15} $	$ E_{HAM}^{20} $	
0.0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.2	1.37×10^{-5}	1.59×10^{-7}	1.09×10^{-8}	9.09×10^{-8}
0.4	6.59×10^{-5}	7.64×10^{-7}	5.26×10^{-8}	1.25×10^{-7}
0.6	1.80×10^{-4}	2.09×10^{-6}	1.44×10^{-7}	1.78×10^{-7}
0.8	3.98×10^{-4}	4.61×10^{-6}	3.17×10^{-7}	2.51×10^{-7}
1.0	7.81×10^{-4}	9.05×10^{-6}	6.24×10^{-7}	3.85×10^{-7}

Fourth example: Linear Fredholm integro-differential equation

The fourth problem is linear for which Xu (2007) used the variational iteration method for the solution.

$$u''(x) = e^x - \frac{4}{3}x + \int_0^1 xtu(t)dt$$

$$u(0) = 1, u'(0) = 2 \tag{16}$$

The exact solution is $u(x) = x + e^x$. The approximate solution

$$u(x) = \sum_{n=0}^{10} C_n x^n \tag{17}$$

is modified as

$$u(x) = 1 + 2x + \sum_{n=2}^{10} C_n x^n \tag{18}$$

when the initial conditions in (16) are taken into account. Now, there are 9 unknown coefficients. Taking 9 equally-spaced collocation points gives

$$u(x) = 4.55861x10^{-7}x^{10} + 2.2831x10^{-6}x^9 + 0.0000254883x^8 + 0.000197785x^7 + 0.00138927x^6 + 0.00833318x^5 + 0.041667x^4 + 0.16667x^3 + 0.5x^2 + 2x + 1 \tag{19}$$

Table 4 shows the analytical and approximate solutions by collocation method and the absolute error.

Table 4. Absolute error values of collocation solution for Eq. (16)

x	Analytical Results	Collocation Values	Absolute Error
0.1	1.0000000000	1.0000000000	3.45x10 ⁻¹²
0.2	1.2051709180	1.20517091807	7.92x10 ⁻¹²
0.3	1.4214027581	1.42140275816	1.23x10 ⁻¹¹
0.4	1.6498588075	1.64985880758	1.69x10 ⁻¹¹
0.5	1.8918246976	1.89182469765	2.14x10 ⁻¹¹
0.6	2.1487212707	2.14872127072	2.61x10 ⁻¹¹
0.7	2.4221188003	2.42211880041	3.08x10 ⁻¹¹
0.8	2.7137527074	2.71375270750	3.56x10 ⁻¹¹
0.9	3.0255409284	3.02554092852	4.06x10 ⁻¹¹
1.0	3.3596031111	3.35960311119	4.46x10 ⁻¹¹

Fifth example: Linear Volterra-Fredholm equation

The problem is

$$u'(x) = -2\sin(x) - x^2 \sin(2x) + 2 \sin(2x) - 2xcos(2x) - 2e^x + 5e^{x-1} + 2x + \int_0^x \cos(t+x) u(t)dt + \int_0^1 e^{x-t}u(t)dt$$

$$u(0) = 0 \tag{20}$$

and it was solved by Rahmani et al. (2011) using Block Pulse Functions and Operational Matrices Method. Taking the approximate solution.

$$u(x) = \sum_{n=1}^{10} C_n x^n \tag{21}$$

gives the coefficients as

$$\begin{aligned}
 C_1 &= -7.278 \times 10^{-14} & C_6 &= 2.9880 \times 10^{-10} \\
 C_2 &= 1.0000 & C_7 &= -4.018 \times 10^{-10} \\
 C_3 &= -9.044 \times 10^{-12} & C_8 &= 3.3680 \times 10^{-10} \\
 C_4 &= 4.518 \times 10^{-11} & C_9 &= -1.598 \times 10^{-10} \\
 C_5 &= -1.439 \times 10^{-10} & C_{10} &= 3.2730 \times 10^{-11}
 \end{aligned} \tag{22}$$

Ignoring the extremely small coefficients the approximate solution becomes $u(x) = x^2$, which is actually the exact solution. Here collocation points are distributed evenly between 0 and 1.

Sixth example: Nonlinear Volterra equation

The problem is given as

$$\begin{aligned}
 u'(x) &= -1 + \int_0^x u^2(t) dt, \quad x \geq 0 \\
 u(0) &= 0
 \end{aligned} \tag{23}$$

For this problem, Sepehrian & Razzaghiand (2004) suggested the single term Walsh series method, while Avudainayagam & Vani (2000) used the Wavelet-Galerkin method for the solution. Taking the approximate solution as

$$u(x) = \sum_{n=1}^{10} C_n x^n \tag{24}$$

the residual is

$$R(x) = u'(x) + 1 - \int_0^x (\sum_{n=1}^{10} C_n t^n)^2 dt \tag{25}$$

By calculating the coefficients C_n , the collocation solution is

$$\begin{aligned}
 u(x) &= -0.00004x^{10} + 0.0007x^9 - 0.0012x^8 - 0.0027x^7 - 0.00075x^6 + 0.00032x^5 + 0.083x^4 + \\
 &0.000017x^3 - 2.004 \times 10^{-6}x^2 - x
 \end{aligned} \tag{26}$$

Table 5 gives the comparison of the collocation results with the other two references. While finding an approximate solution, collocation points are distributed equally between 0 and 1.

Table 5. Comparison of the collocation method results with Wavelet-Galerkin Method and Walsh Series Method

x	Exact Solution	Wavelet-Galerkin Method	Walsh Series Method	Collocation Method
0.0000	0.000000	0.0000	0.00000	0.00000
0.0625	-0.06250	-0.0625	-0.06250	-0.06249
0.1250	-0.12498	-0.1250	-0.12498	-0.12498
0.1875	-0.18740	-0.1874	-0.18740	-0.18739
0.2500	-0.24967	-0.2497	-0.24967	-0.24967
0.3125	-0.31171	-0.3117	-0.31171	-0.31170
0.3750	-0.37336	-0.3734	-0.37336	-0.37335
0.4375	-0.43446	-0.4345	-0.43446	-0.43445
0.5000	-0.49482	-0.4948	-0.49482	-0.49482
0.5625	-0.55423	-0.5542	-0.55423	-0.55422
0.6250	-0.61243	-0.6124	-0.61243	-0.61243
0.6875	-0.66917	-0.6692	-0.66916	-0.66916
0.7500	-0.72415	-0.7242	-0.72415	-0.72415
0.8125	-0.77709	-0.7771	-0.77709	-0.77709
0.8750	-0.82767	-0.8277	-0.82766	-0.82766
0.9375	-0.87557	-0.8756	-0.87557	-0.87556
1.0000	-0.92048	-0.9205	-0.92047	-0.92047

In this problem if five collocation points are used, surprisingly, multiple solution sets are found including complex ones. Our impression is that taking the real solutions with the least absolute values gives both satisfactory results and a method of choosing among the many solutions. Table 6 shows the estimated solution values obtained by taking the real solution: $C_1 = 138.918, C_2 = -877.202, C_3 = 2594.84, C_4 = -3445.43, C_5 = 1786.8$ and the complex solution $C_1 = -3109.7 - 4719.65i, C_2 = 31682.5 + 59409.17i, C_3 = -127778.8 - 228312.45i, C_4 = 214035.32 + 341606.73i, C_5 = -123282.4 - 173256.87i$

Table 6. Values of approximate solutions for different real or complex coefficients

x	Exact Solution	Real Coefficients	Complex Coefficients
0.0000	0.000000	0.00000	0.0000
0.0625	-0.06250	5.83844	-98.6-113.6i
0.1250	-0.12498	7.93987	-94.7-29.4i
0.1875	-0.18740	8.46831	-75.5+80.7i
0.2500	-0.24967	8.73501	-78.1+130.9i
0.3125	-0.31171	9.40295	-103.4+100.7i
0.3750	-0.37336	10.6913	-130.7+15.2i
0.4375	-0.43446	12.5800	-131.03-74.3i
0.5000	-0.49482	15.0142	-81.9-110.4i
0.5625	-0.55423	18.1086	18.6 -49.5i
0.6250	-0.61243	22.3523	138.4 +118.5i
0.6875	-0.66917	28.8130	196.5 +350.6i
0.7500	-0.72415	39.3416	49 +530.4i
0.8125	-0.77709	56.7767	-524.2+448.4i
0.8750	-0.82767	85.1489	-1834.9-217.4i
0.9375	-0.87557	129.886	-4299.3-1922.1i
1.0000	-0.92048	198.016	-8453.08-5273.07i

Seventh example: High order Fredholm equation

The third order problem

$$u'''(x) = \sin x - x - \int_0^{\pi/2} xtu'(t)dt$$

$$u(0) = 1$$

$$u'(0) = 0$$

$$u''(0) = -1, 0 \leq x \leq \frac{\pi}{2} \tag{27}$$

was also studied by Al-Saar & Ghadle (2021) and the exact solution is $u(x) = \cos(x)$. Paying attention to the initial conditions in (27) approximate solution is taken as

$$u(x) = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \sum_{n=3}^{10} C_n x^n \tag{28}$$

Absolute error values for various N values are given in Table 7.

Table 7. Absolute error values for collocation solutions

x	Exact Solution	Collocation solution with N=15	Absolute error for N=10	Absolute error for N=15
0.00000	1.00000	1.00000	0.00000	0.00000.
0.15708	0.987688	0.9876883	2.03x10 ⁻¹⁰	1.30x10 ⁻¹¹
0.31415	0.951057	0.9510565	1.05x10 ⁻⁹	2.08x10 ⁻¹⁰
0.47123	0.891007	0.8910065	2.54x10 ⁻⁹	1.05x10 ⁻⁹
0.62831	0.809017	0.8090169	4.65x10 ⁻⁹	3.33x10 ⁻⁹
0.78539	0.707107	0.7071067	7.31x10 ⁻⁹	8.13x10 ⁻⁹
0.94247	0.587785	0.5877852	1.04x10 ⁻⁸	1.68x10 ⁻⁸
1.09956	0.453990	0.4539905	1.39x10 ⁻⁸	3.12x10 ⁻⁸
1.25664	0.309017	0.3090170	1.78x10 ⁻⁸	5.32x10 ⁻⁸
1.41372	0.156434	0.1564345	2.17x10 ⁻⁸	8.53x10 ⁻⁸
1.57080	6.12x10 ⁻¹⁷	1.301x10 ⁻⁷	2.58x10 ⁻⁸	1.30x10 ⁻⁷

Eighth example: Nonlinear Fredholm equation

Finally, we use the same method to find the approximate solution of the nonlinear Fredholm integro-differential equation which is studied by Islam et al. (2013).

$$u'(x) + u(x) = \frac{1}{2}(e^{-2} - 1) + \int_0^1 u^2(t)dt$$

$$u(0) = 1 \tag{29}$$

Exact solution is $u(x) = e^{-x}$. Approximate solution for (29) is taken as

$$u(x) = 1 + \sum_{n=1}^{10} C_n x^n \tag{30}$$

and after evaluating the coefficients C_n , the collocation solution is

$$u(x) = 1 - 0.999x + 0.499x^2 - 0.166x^3 + 0.041x^4 - 0.008x^5 + 0.001x^6 - 0.0001x^7 + 0.00002x^8 - 0.000002x^9 + 1.677 \times 10^{-7}x^{10} \quad (31)$$

Table 8 gives the errors in collocation as well as the two other methods indicated above.

Table 8. Comparison of absolute error values of the approximate solutions of Eq. (29)

x	Haar wavelet	B-Spline wavelet	Collocation
0.125	3.759×10^{-7}	7.5×10^{-7}	6.2983×10^{-13}
0.250	6.6413×10^{-7}	2.0×10^{-7}	6.4948×10^{-13}
0.375	8.6917×10^{-7}	1.8×10^{-6}	6.7090×10^{-13}
0.500	1.0020×10^{-6}	3.0×10^{-6}	6.9033×10^{-13}
0.625	1.0757×10^{-6}	3.4×10^{-6}	7.0754×10^{-13}
0.750	1.1029×10^{-6}	3.0×10^{-6}	7.2214×10^{-13}
0.875	1.0944×10^{-6}	1.6×10^{-6}	7.3024×10^{-13}

CONCLUSION

Linear and nonlinear Volterra-Fredholm integro-differential equations were solved using the point collocation method. Eight test cases were chosen from the literature and the solutions were carried out using 5 to 20 collocation points. In all cases, it was observed that the solution is very close to exact solution for even 5 or 10 collocation points. The nonlinear problems naturally lead to a nonlinear system of algebraic equations which are considerably harder to solve than linear systems. It was observed that, of possible multiple solutions of the nonlinear system, the ones with the smallest absolute values give very good approximate solutions.

In terms of effort, the other solution methods mentioned above use complicated and computationally more costly mathematical operations compared to the collocation method which simply forms the residual and obtains a system of equations without any intermediary operations. Therefore, it is safe to conclude that the collocation method requires less effort.

These results show that the collocation is a powerful and simple to apply method which can easily be adopted to other types of equations such as fractional differential equations.

REFERENCES

- Abdi, A., Berrut, J.-P., & Hosseini, S.A. (2022). Explicit methods based on barycentric rational interpolants for solving non-stiff Volterra integral equations. *Applied Numerical Mathematics*, 174, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2022.01.004>
- Ahmadinia, M., Afsharijmand, H., & Salehi, M. (2023). Numerical solution of multi-dimensional Itô Volterra integral equations by the second kind Chebyshev wavelets and parallel computing process. *Applied Mathematics and Computation*, 450. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2023.127988>
- Al-Saar, F., & Ghadle, K. (2021). Solving nonlinear Fredholm integro-differential equations via modifications of some numerical methods. *Advances in the Theory of Nonlinear Analysis and its Applications*, 5(2), 260-276. <https://doi.org/10.31197/atnaa.872432>
- Al-Towaiq, M., & Kasasbeh, A., (2017). Modified Algorithm for Solving Linear Integro-Differential Equations of the Second Kind. *American Journal of Computational Mathematics*, 7(2), 157-165. <https://doi.org/10.4236/ajcm.2017.72014>
- Avudainayagam, A., & Vani, C. (2000). Wavelet-Galerkin method for integro-differential equations. *Applied Numerical Mathematics*, 32(3), 247-254. [https://doi.org/10.1016/S0168-9274\(99\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0168-9274(99)00026-4)

- Boonklurb, R., Duangpan, A., & Gugaew, P. (2020). Numerical solution of direct and inverse problems for time-dependent volterra integro-differential equation using finite integration method with shifted chebyshev polynomial. *Symmetry*, 12(4), 497. <https://doi.org/10.3390/sym12040497>
- Cimen, E., & Enterili, K. (2020). Fredholm İntegro Diferansiyel Denklemin Sayısal Çözümü için Alternatif Bir Yöntem. *Erzincan University Journal of Science and Technology*, 13(1), 46-53. <https://doi.org/10.18185/erzifbed.633899>
- Çakır, M., & Güneş, B. (2022). A new difference method for the singularly perturbed Volterra-Fredholm integro-differential equations on a Shishkin mesh. *Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics*, 51(3), 787-799. <https://doi.org/10.15672/hujms.950075>
- Dzhumabaev, D.S. (2016). On one approach to solve the linear boundary value problems for Fredholm integro-differential equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 294, 342-357. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.08.023>
- Jaradat, H., Alsayed, O., & Al-Shara, S. (2008). Numerical Solution of Linear Integro-Differential Equations. *Journal of Mathematics and Statistics*, 4(4), 250-254. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2008.250.254>
- Lakshmikantham, V., & Rama Mohana Rao, M. (1995). *Theory of Integro-Differential Equations* (1st ed.). Lausanne, Switzerland: Gordon & Breach Science Publishers.
- Olayiwola, M. O., & Kareem, K. (2022). A New Decomposition Method for Integro-Differential Equations. *Cumhuriyet Science Journal*, 43(2), 283-288. <https://doi.org/10.17776/csj.986019>
- Rabiei, F., Abd Hamid, F., Md Lazim, N., Ismail, F., & Abdul Majid, Z. (2019). Numerical Solution of Volterra Integro-Differential Equations Using Improved Runge-Kutta Methods. *Applied Mechanics and Materials*, 892, 193-199. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.892.193>
- Rahmani, L., Rahimi, B., & Mordad, M. (2011). Numerical Solution of Volterra-Fredholm Integro-Differential Equation by Block Pulse Functions and Operational Matrices. *General Mathematics Notes*, 4(2), 37-48. https://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/EMIS/journals/GMN/yahoo_site_admin/assets/docs/4_GMN-482-V4N2.160165143.pdf
- Sakran, M.R.A. (2019). Numerical solutions of integral and integro-differential equations using Chebyshev polynomials of the third kind. *Applied Mathematics and Computation*, 351, 66-82. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.01.030>
- Sepehrian, B., & Razzaghi, M. (2004). Single-term Walsh series method for the Volterra integro-differential equations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 28(11), 1315-1319. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2004.05.001>
- Islam, S. U., Aziz I., & Fayyaz, M. (2013). A new approach for numerical solution of integro-differential equations via Haar wavelets. *International Journal of Computer Mathematics*, 90(9), 1971-1989. <https://doi.org/10.1080/00207160.2013.770481>
- Wen, J., & Huang, C. (2024). Multistep Runge-Kutta methods for Volterra integro-differential equations. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 436. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115384>
- Xu, L. (2007). Variational Iteration Method for Solving Integral Equations. *Computers & Mathematics with Applications*, 54(7-8), 1071-1078. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2006.12.053>
- Zarebnia, M. (2010). Sinc numerical solution for the Volterra integro-differential equation. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(3), 700-706. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.04.021>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.08.2023
Kabul Tarihi : 09.10.2023

Received Date : 25.08.2023
Accepted Date : 09.10.2023

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SPEED LOSSES IN POLY-V BELT SYSTEMS ON HOUSEHOLD DRYERS

EV TİPİ KURUTUCULARDA BULUNAN POLY-V BANT SİSTEMLERİNDEKİ HIZ KAYIPLARININ DENEYSSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet MUTLUDOĞAN^{1*} (ORCID:0000-0003-2459-8708)
*Berna BOLAT*¹ (ORCID: 0000-0001-9520-7431)
*Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ*¹ (ORCID: 0000-0001-6785-7971)

¹ Yildiz Technical University, Department of Mechanical Engineering, Istanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet MUTLUDOĞAN, mehmet.mutludogan@std.yildiz.edu.tr

ABSTRACT

A decrease in rotational speed in gear belt systems is one of the fundamental problems that affects the efficiency of the belt. Therefore, in this study, the speed loss behavior of a Poly-V gear belt drive system with two different designs has been experimentally investigated. In the study, experiments were conducted with two different home-type dryers; one used two belts and a stepped pulley to adjust the speed, while the other used a single belt to reach the required speed. The experimental studies were conducted with two different home-type dryers. The results were analyzed using statistical methodology to determine whether the normal distribution was suitable for the measurement results, and a pairwise comparison of the speed losses in the two systems was made. Additionally, the predicted formula for loss calculation was compared with the results of variance analysis (ANOVA), and it was found that very similar results were obtained. As a result of the experimental study and analysis, it was observed that the single-belt drive system is more efficient compared to the two-belt drive system. With the efficiency curve obtained from this study, it is possible to calculate speed loss and efficiency gain for similar belt drive systems.

Keywords: Belt and pulley systems, speed losses, two sample t-test, variance analysis

ÖZET

Dişli kayış sistemlerinde dönme hızındaki azalma kayışın verimini etkileyen en temel problemlerden biridir. Bu nedenle bu çalışmada, iki farklı tasarıma sahip Poly-V dişli kayış tahrik sistemine ait hız kaybı davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada deneyler, iki farklı ev tipi kurutucu ile gerçekleştirildi; biri iki kayış ve kademeli bir kasnak kullanarak devri ayarlarken, diğeri gerekli devire ulaşmak için tek bir kayış kullandı. Deneysel çalışmalar iki farklı ev tipi kurutucu ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar istatistiksel metodolojiye göre analiz edilerek; normal dağılımın ölçüm sonuçları için uygun olup olmadığı tespit edilerek iki sistemdeki hız kayıplarının ikili karşılaştırması yapılmıştır. Ayrıca, kayıp hesabı için öngörülen formül, varyans analizi (ANOVA) sonuçlarıyla da kıyaslanmış ve çok yakın sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışma ve analizler sonucunda tek kayışlı tahrik sisteminin iki kayışlı tahrik sistemine göre daha verimli olduğu görülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen verimlilik eğrisi kullanıldığında benzer kayış tahrik sistemleri için dönüş hızı kaybı ve verimlilik kazancı hesaplanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kayış kasnak sistemleri, hız kaybı, iki örneklemlili t-testi, varyans analizi

ToCite: MUTLUDOĞAN, M., BOLAT, & B., AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ B., (2023). AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SPEED LOSSES IN POLY-V BELT SYSTEMS ON HOUSEHOLD DRYERS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 1021- 1029.

INTRODUCTION

The concept is widely recognized that belts and pulleys usually operate under the assumption of a secure frictional connection between them. However, in certain circumstances, the frictional link weakens. This situation can lead to the driver experiencing some advancement without moving the belt along. This phenomenon, known as belt slip, is typically quantified in terms of percentage. The consequence of belt slip is a reduction in the rotational velocity of the system.

Within the scope of the literature review, studies show that two main causes of slip between a belt and pulley are defined. One of these is caused by the force-related mechanism and is formed as a function of the friction coefficient during torque transmission. The second reason is the formation of the elastic deformation shear during the winding and separation of the strap caused by the tension differences at the entrance and exit points of the belt. However, there are changes in the amount of shear between the belt and the pulley due to environmental factors as well as the effect of temperature and relative humidity on the friction coefficient between the belt and the pulley. (Uçar and Cengiz, 2007; Uçar and Cengiz, 2004).

The issue of rotational speed reduction between pulleys using flexible elastic belts, as well as the development of transmission systems aimed at curbing energy consumption, remains a topic of significant importance for industries like white goods and others. In examining the matter of rotational speed loss between pulleys, the technical literature seemed to be categorized into two distinct methodologies. One avenue involves the experimental analysis of belt systems under varying environmental conditions, while the other delves into analytical models addressing power losses in rubber V-belt systems. (Bertini et al., 2014; Zhu et al, 2010) The effect of slip between belt and pulley on power losses was experimentally investigated by several authors (Lubarda, 2015; Balta et al.; 2015(a); Balta et al., 2015; Čepon et al., 2010.), but a pairwise comparison of different Poly-V belt transmission systems is still not available. Many companies have patented designs to reduce the slip rate of the belt. However, these additional designs increase the cost. (Markus and Renhard, 2005; Kevin, 1996)

Firbank et al., considering that in the “Mechanics of The Belt Drive”, the belt is formed from a soft coating to accommodate the muscular tension with a robust pulling element (cord) for power transmission; the shear stresses in the belt envelope are an important determinant of the behavior of the mechanism and that this phenomenon is opposite to the traditional creep (elastic shift) phenomenon which is based on the longitudinal stretch of the belt (Firbank, 1970).

Gerber et al., referring to the work of K. H. Bussmann (1961) in his work “A Note On Slip in V-Belt Drives”, Bussmann experimentally proved that the slip curves for the given gentle versus slip curves are basically composed of two parts, the load in the load increases linearly with the transmitted power, whereas in the maximum power zone, it increases rapidly. In the work of B.G. Gerber's “Slip in V-Ribbed Belt Drives”, in this study where a small part of the nonlinear part of the slip curve is analyzed by the slip curve, the fast increasing section is examined in more detail, and the remarkable situation was found that when the constant a portion of the shear curve was elongated, the excessive shear was determined by the moment transmitted many times, and the belt elasticity was determined at a lesser degree. (Gerbert, 1976)

The torque load transmitted by the pulley belt system causes the forces in the belt to vary. Because of tight belt compatibility, the tension on the loose side will be different. Under the influence of the kite in a single circuit, the tight side belt speed must be higher than the slack side speed. (Grzegoek and Kot, 2016)

The provided diagram in Figure 1 illustrates distinct belt systems. These systems are comprised of two primary components: pulleys and belts. Within the scope of this study, a comparison is drawn between two belt systems. The first system encompasses two pulleys, one of which is a stepped pulley, and employs two belts. In contrast, the second system involves two pulleys connected by a single belt. All belts employed are of the Poly-V type. In industrial settings, Poly-V belts are commonly employed in conjunction with grooved disks or pulleys, as their design takes advantage of the wedging effect in the grooves to enable enhanced power transmission without slipping, surpassing the capabilities of flat belts. A comprehensive analysis of power transmission dynamics for these belt-pulley systems is conducted under conditions of external vibration, considering both micro and macro slip regions. Here, ω_1 and ω_2 denote the pulley speeds.

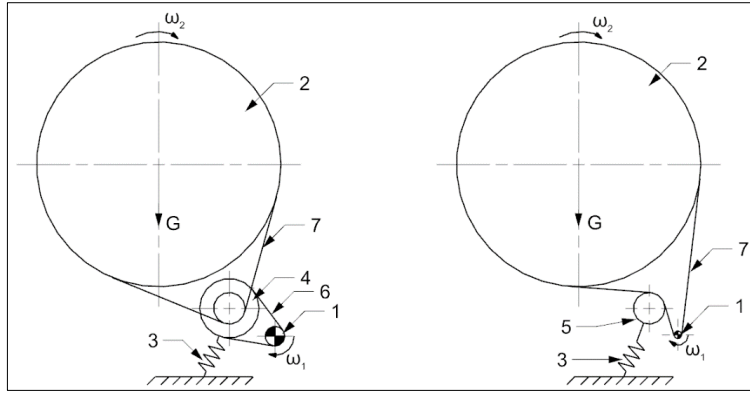


Figure 1. Physical Models of Different Belt Systems on Household Tumble Dryers. 1: Drive Pulley, 2: Tumble, 3: Spring, 4: Stepped Pulley, 5: İdler Pulley, 6: Flexible Belt, 7: Poly-V Belt

Within the fundamental principles of the belt drive system theory, the angle of winding can be categorized into the reserve angle and the active angle. Notably, alterations in belt tension, and subsequently the emergence of slip-wound spring, occur within the active segment. This disparity in speed between the driving and driven pulleys results from the relative sliding that takes place between the belt and the pulleys.

For this reason, the speed losses can be defined as:

$$Loss\% = \frac{\omega_1}{\omega_2} \times 100. \quad (1)$$

The aim of this paper is to investigate and pairwise comparison of the speed losses in Poly V belt systems on household tumble dryers with statistical analysis methodology. The results of the analysis are examined multi vari charts and other statistical tools. During the measurement, the slip rate at different loads was measured.

EXPERIMENTAL DESIGN

The aim of this study is to determine the amount of slip due to environmental conditions measured in the Poly-V belt and pulley mechanism. The working principle of the tried and tested method is based on the fact that during the operation of the Poly-V belt and pulley mechanism in different environments, the difference in the amount of rotation between the rotating pulleys is determined.

Experimental studies were conducted in a laboratory condition with 25°C and 50% relative humidity. The experimental setup comprises the tumble dryer machine, two different belt-pulley systems, a dynamic signal analyzer, an accelerometer, and a stroboscope. Figure 2 represents the experimental members.

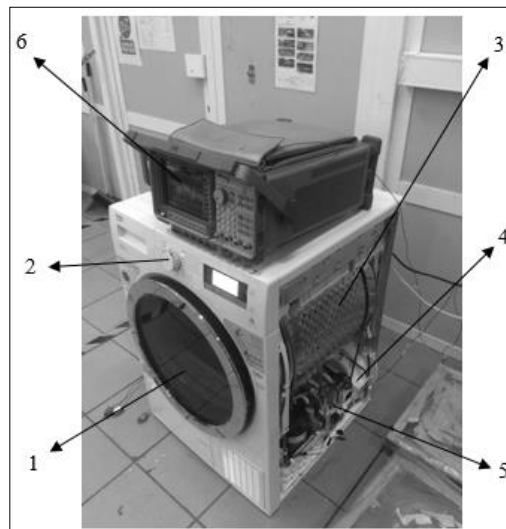


Figure 2. Test setup. 1: Tumble Dryer, 2: Control Panel, 3: Tumble, 4: Belt system, 5: Motor, 6: Dynamic Signal Analyzer

In tumbler dryer machines, there are plenty of different drying programs. An ascertainment has been done on tumble dryer programs that users frequently use. This research has been discussed with people from different age and gender groups. As a result of this observation, the most common program found out as of Cotton Cup-board Dry. All of the experiments were carried out in Cotton Cupboard Dry drying program using the same load. In this study, fixed weights were used instead of different fabric types as experiment load. The reason for this is the need to test in high weights.

The test conditions of the system are as follows; Four different weight sets were used during the experiment. These are empty weights (0 kg), weights of 14 kg, 18 kg, and 24 kg. The purpose of adding more load than the normal capacity of the machine is the desire to reveal the effect of the belt slip rate. For the design of experiments, Multilevel Factorial Design was selected. This experiment contains 2 factors, one of them 2 level and the other one 4 level. These two factorial structures reveal 8 base runs. The experiment was designed with 10 repetitions to give better results. Both belt pulley systems were cycled in 10 times drying programs with these four different weight sets. The sum of multiple experiments with two different systems, and four different weight loads, makes up to 80 experiments.

During all these experiments, the speeds of the motor, pulleys, and drums were precisely measured. In the single belt system, the drum diameter is 617 mm, and the motor shaft diameter is 11 mm. In the double belt system, the drum diameter is 617 mm, the motor shaft diameter is 22.5 mm, the idler pulley inner diameter is 33 mm, and the idler pulley outer diameter is 65 mm. Different measuring instruments have been used for measuring different sensitivities. The electric motor used in the experiment is rotating at high revs because of the 3000 rpm asynchronous electric motor. A Hewlett Packard 35670A Dynamic Signal Analyser was used to precisely measure the motor speed. The device is shown in Figure 3. Vibration from the accelerometer sensor connected to the motor and the speed at which the motor returns are calculated precisely.



Figure 3. Hewlett Packard 35670A Dynamic Signal Analyzer

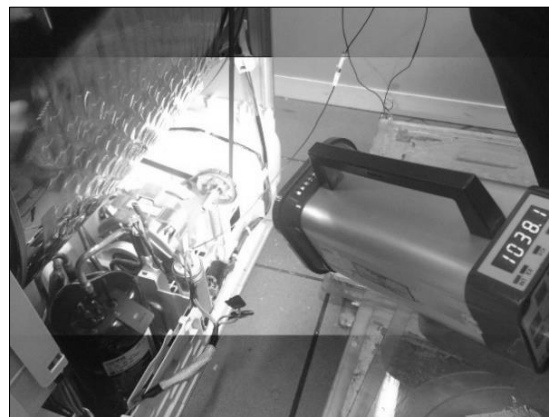


Figure 4. DT-315A Battery Powered Digital Stroboscope

Both belt pulley systems rotate at lower speeds than the electric motor. The stroboscope shown in Figure 4 is used to accurately measure the revolutions of the pulleys. Before the experiments, the pulleys were marked. When the system is started, the light pulses of the stroboscope are changed until the mark on the pulley is stable. When the mark on the pulley is seen as fixed, the number on the stroboscope indicates the speed at which the machine returns.

The drum, tumble dryer is the slowest rotating element of the drive system. In general, the number of revolutions is about 55 rpm, so it can be counted with the eye. Multiple experiments were carried out at different weight loads, and the speed of each belt pulley element was precisely calculated.

After all measurements, the theoretical number of revolutions of the drum according to the number of revolutions of the motor was compared with the measurements obtained during the experiments. In each set of experiments, the theoretical and measured revolutions were compared to find out the speed lost by % rate. All the calculated speed losses were collected by classifying the belt-pulley systems set and weights according to a table.

RESULTS AND DISCUSSION

In this paper, all the speed losses calculated after the tests are shown in Table 1. The results were analyzed according to statistical methodology.

The significance control of the difference between the two sample averages is made by one of the z or t-tests according to the sample size. With these tests, it is not possible to test two sample averages together and to check the significance of the differences between them. The variance analysis is used when testing whether the difference between two or more sample averages is significant. After the variance analysis, the t-test can be applied when the differences between the sample averages are not random.

One-way analysis of variance is a method of testing the equality of two or more averages using variances. It is used to analyze completely randomized experimental design models. In order to be able to perform two-sample variance analysis, the collected samples must meet certain assumptions.

Table 1. Results of Speed Losses Rate in Belt Systems

No	One Poly-V Belt System				Two Poly-V Belt System			
	0 Kg	14	18	24	0 Kg	14	18	24
1	2,158	3,332	3,608	4,635	2,905	3,848	4,490	4,786
2	2,165	3,575	4,301	3,949	2,902	4,178	4,522	5,190
3	2,001	3,423	5,175	2,912	2,967	4,154	4,667	4,550
4	2,348	4,037	4,450	4,606	2,849	4,165	4,239	4,634
5	2,148	3,803	3,524	4,326	3,495	4,369	3,529	4,920
6	2,235	3,639	2,334	3,918	2,716	4,107	4,857	4,492
7	2,242	2,956	2,676	5,325	2,927	4,052	4,286	5,888
8	2,253	3,956	3,750	3,164	2,954	4,192	4,616	4,081
9	2,324	3,484	5,604	4,047	2,724	4,274	3,520	6,013
10	2,203	3,336	2,743	5,575	3,592	4,226	5,058	5,815

- Both sets of populations exhibit a normal distribution.
- The samples for both groups are independently drawn from their respective populations.
- In each sample, observations are selected in a random and independent manner from one another.

For the two-sample variance test, we first examine whether the data collected from the belt pulley mechanism are appropriate for normal distribution.

The p-value and the significance level are compared to determine whether the data is following a normal distribution. A level of significance of 0.05 is selected for this study. A significance level of 0.05 indicates that 5% of the subjects did not follow a normal distribution of risk. If the p-value is less than 0.05, the regression model is statistically significant; otherwise, the variable does not have a statistically significant effect on the response parameter.

In this case, one and two poly-v belt systems are analyzed by Minitab, and the results are shown in Figure 5. According to the results, both measurements fit the normal distribution since one Poly-V belt system's p-value is 0.189 and two Poly-V belt systems' p-value is 0.071, which is greater than the significance level of 0.05.

The percentage of loss rates, normal distributions, and their averages in both belt-pulley systems are shown in Figure 6. It is seen that the normal distribution of the resultant analysis data is appropriate. When the Anderson-Darling

Normality Test analysis is performed in the normal distribution analysis of the single belt system, the mean is 3.539, st. dev. is 1.063, a-squared value is 0.73, and the p-value is 0.052. When the same test is performed on two belt systems, the mean is 3.700, st. dev. is 0,778, a-squared value is 1.26, and p-value is 0.055. Variance analysis must be done before the difference evaluation.

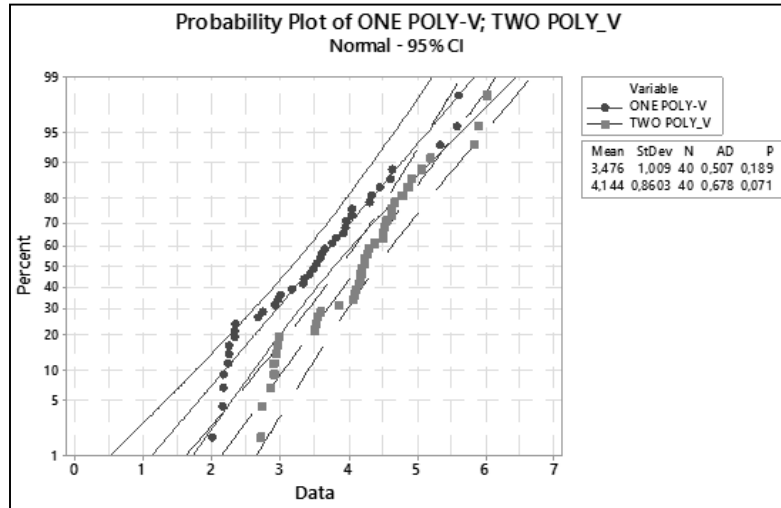


Figure 5. Probability Plot of One Poly-V and Two Poly-V Belt Systems

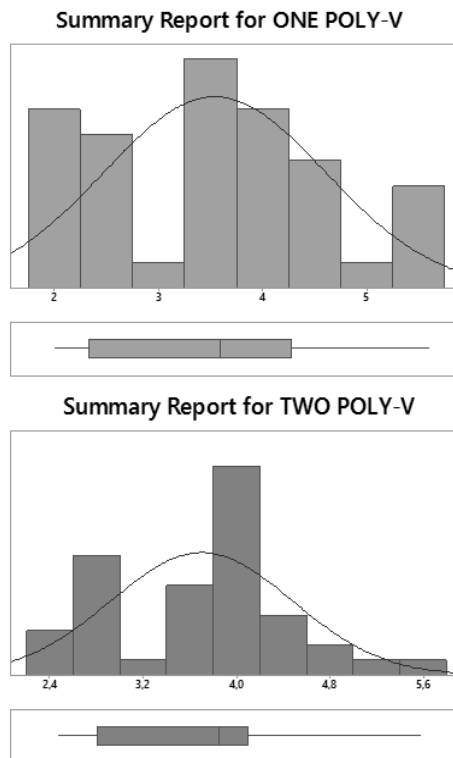


Figure 6. Summary Report for Belt Systems

The result of the analysis of variance is that although these data are randomly different but belong to a single system or they will come out from two different systems in real terms.

As shown in Figure 7, the resulting variance analysis resulted in a p-value of 0.323. Since the calculated 0.323 value is higher than 0.05, it is clear that the data belong to two different systems. In this case, Two-Sample T Tests can be used to compare two systems.

The two-sample t-test is used to determine whether two populations are equal. A common practice is to test whether a new process or system is superior to an existing process or system. As a result of the Two-Sample T-Test analysis,

the p-value is 0.002. The analysis result values are shown in Figure 8. Since the p-value is 0.002, less than 0.05 (or 5 percent), it can be concluded that there is a difference between the means.

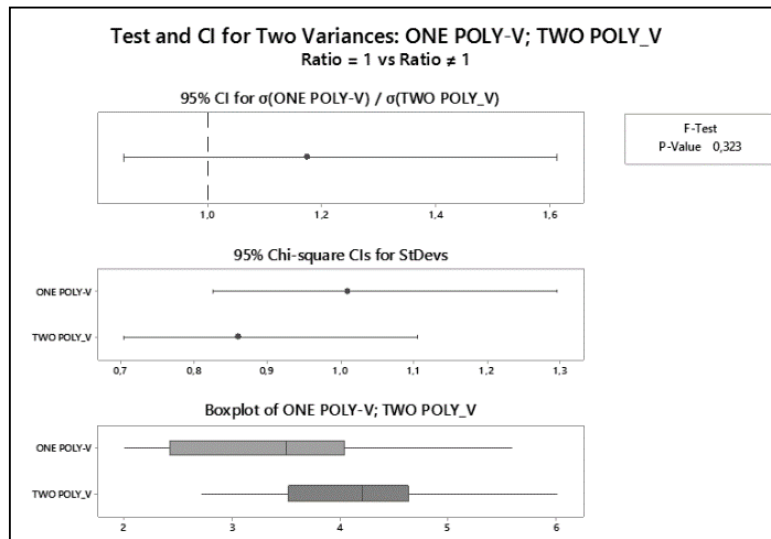


Figure 7. Test and CI for Two Variances One-Poly-V and Two-Poly-V

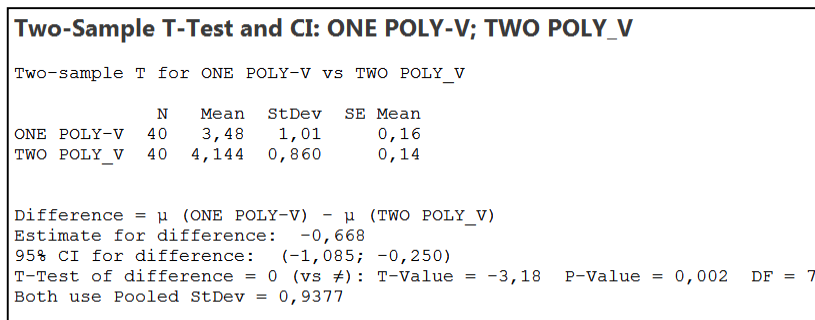


Figure 8. Two-Sample T-Test and CI: One-Poly-V; Two-Poly

As a result of the analysis, it has been found that there is a significant difference between the single-belt drive system and the two-belt drive system. As a result of the calculations made, it has been determined that the single belt system is more efficient with 19% less speed loss than the two-belt drive system. The efficiency between the systems varies according to the loads used during different experiment sets. The Multi-Vari chart is used to determine how much difference is in which load group. Figure 9 shows a graph of loss rates under different loads in two systems. As can be seen in this graph, the single belt system is more efficient in all conditions.

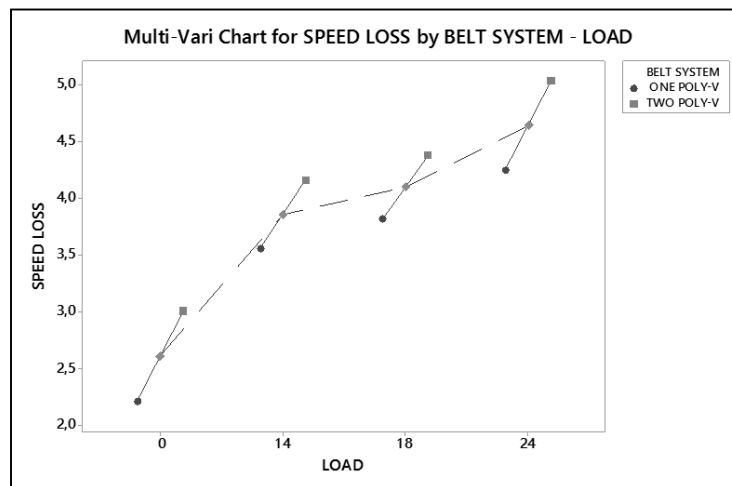


Figure 9. Probability Plot of Multi-Vari Chart for Speed Loss

Finally, the model equation (2) for the system is derived from the data obtained from the study. When the model equation and real experimental results are compared, it is seen that 96.9% of the equations are suitable.

$$SLR=1,587+(0,08438\times L)+(0,688\times NOBS) \quad (2)$$

CONCLUSIONS

In this study, the speed loss behavior of two Poly-V ribbed belt drive systems is investigated using experimental methodologies. The sum of multiple experiments with two different systems, and four different weight loads, makes up to 80 experiments. The results were analyzed according to statistical methodology and analysis of variance (ANOVA). Through the analysis of belt pulley drive systems, the following conclusions are obtained:

- 1- The resulting variance analysis resulted in a p-value of 0.323. Since the calculated 0.323 value is higher than 0.05, it is clear that the data belong to two different systems.
- 2- As a result of the analysis, it has been found that there is a significant difference between the single-belt drive system and the two-belt drive system. As a result of the calculations made, it has been determined that the single-belt system is more efficient with 19% less speed loss than the two-belt drive system.
- 3- The efficiency between the systems varies according to the loads used during different experiment sets. The maximum efficiency between the two systems appears to be 0 kg load parameter. Since the optimum operating condition of the tumble dryer is 7kg, the yield conditions in the low weight group are taken as the basis.
- 4- The single belt drive system has been selected for the tumble dryer to work more efficiently with the existing drum dimensions and electric motor.

NOMENCLATURE

$\omega_{1,2}$: Angular velocity
RPM : Revolutions Per Minute
L : Load
SLR : Speed Loss Rate
NOBS: Number of Belt Stage

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank to Arcelik Company for their valuable assistance during the experimental procedures and support of the project.

REFERENCES

- Balta, B., Sonmez, F.O. and Cengiz, A. (2015a). Experimental identification of the torque losses in V-ribbed belt drives using the response surface method. *Journal of Automobile Engineering*, 229 (8), 1070-1082. <https://doi.org/10.1177/0954407014555150>
- Balta, B., Sonmez, F.O. and Cengiz, A. (2015b). Speed losses in V-ribbed belt drives. *Mechanism and Machine Theory*, 86, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.11.016>
- Bertini, L., Carmignani, L. and F. Frendo F. (2014). Analytical model for the power losses in rubber V-belt continuously variable transmission (CVT). *Mechanism and Machine Theory*, 78, 289–306. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.03.016>
- Čepon, G., Manin, L., and Boltežar, M. (2010). Experimental identification of the contact parameters between a V-ribbed belt and a pulley. *Mechanism and Machine Theory*, 45, 1424–1433. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2010.05.006>
- Markus, F., Reinhard, H. (2005). *Bosch Siemens Hausgeraete*. WO Patent No: WO2005064065, European Patent Office.
- Firbank, T. C. (1970). Mechanics of the belt drive. *Int. J. Mech. Sci. Pergaman Press*, 12, 1053. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(70\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0020-7403(70)90032-9)

- Gerbert, B. G. (1976). A note on slip in V-belt drives. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 98(4), 1366-1368.
- Grzegoek, W. and Kot, A. (2016). The experimental analysis of the slip in the rubber belt CVT. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 148(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/148/1/012006>
- Kevin, T. (1996). *White Consolidated Ind. Inc.* US Patent No:US5501021, US Patent and Trademark Office.
- Lubarda, V.A. (2015). Determination of the belt force before the gross slip. *Mechanism and Machine Theory*, 83, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.015>
- Uçar, M., Cengiz, A. (2004), V-Kayışlarda çalışma ortam şartlarının kaymaya etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *J. Fac. Eng. Pamukkale Univ*, 10(1),137-144.
- Uçar, M., Cengiz, A. (2007). V-Kayış mekanizmalarında sıcaklık ve nemin kaymaya etkisinin deneysel incelenmesi. *J. Fac. Eng. Gazi Univ*, 22(2), 269-275.
- Zhu, C. and et al. (2010). Experimental investigation on the efficiency of the pulley-drive cvt. *International Journal of Automotive Technology*, 11(2), 257–261. <https://doi.org/10.1007/s12239-010-0032-2>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.08.2023
Kabul Tarihi : 31.10.2023

Received Date : 30.08.2023
Accepted Date : 31.10.2023

STM32F407 VE NODEMCU ESP8266 KARTLARI KULLANARAK KABLOSUZ ÇOK YÖNLÜ KONTROLLÜ ROBOTİK ARAÇ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF A WIRELESS MULTI WAY CONTROLLED ROBOTIC VEHICLE SYSTEM USING STM32F407 AND NODEMCU ESP8266 BOARDS

Muhammed Fatih ACUN¹ (ORCID: 0009-0004-2118-6868)

Metehan DALDAL¹ (ORCID: 0009-0004-5277-104X)

Kemal AVCI^{1*} (ORCID: 0000-0001-5040-3594)

¹ İzmir Demokrasi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kemal AVCI, kemal.avci@idu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, kablosuz uzaktan çok yönlü olarak kontrol edilebilen üç tekerlekli bir robotik aracın gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Sistem, Türkçe sesli komutlar ve dokunmatik butonlar kullanarak, bilgisayarlar ve mobil akıllı telefonlar aracılığıyla hem internetsiz hem de internetli olarak kontrol edilebilen bir yapı sunmaktadır. STM32F407 tabanlı ilk çalışmada, Bluetooth üzerinden bilgisayar tabanlı olarak butonlu ve sesli komutlarla robotik aracın kontrolü yapılmış, bu doğrultuda Tkinter tabanlı bir kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Sesli komutların internetsiz olarak algılanabilmesi için, öncelikle 5 Türkçe komutun bilgisayar ortamında doğru tanınması için Mel-Frekans Kepstral Katsayıları (MFCC) öznitelik çıkarma işleminde ve Dinamik Zaman Bükmesi (DTW) yöntemi de eşleştirme ve karar verme işleminde kullanılmıştır. 15 katılımcıdan 5 sesli komut için örnekler alınmış ve kullanılan yöntem test edilmiştir. Sonuçlar 5 sesli komutun %100 doğrulukla tanındığını göstermiştir. Daha sonra STM32F407 tabanlı akıllı telefon ve Bluetooth temelli kontrol çalışması ele alınmış ve sesli komutlar için Google asistan tabanlı çalışan bir mobil arayüz tasarlanmıştır. Üçüncü ve dördüncü çalışmalar ise NodeMCU kartı kullanarak sırasıyla Bluetooth ve Wi-Fi bağlantılar üzerinden aracın kontrollerini içermektedir. Nesnelerin interneti temelli kontrol için Arduino IoT Cloud tabanlı bir arayüz geliştirilmiştir. 10 katılımcıyla yapılan gerçek zamanlı çalışmalar, STM32F407 ve NodeMCU kartları tabanlı tüm kontrol yöntemlerinin başarılı bir biçimde çalıştığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Robotik araç kontrolü, ses komut tanıma, dinamik zaman bükmesi, STM32F407, nodeMCU

ABSTRACT

This study aims to realize a wireless remotely multi way controllable three-wheeled robotic vehicle. The system provides a structure that can be controlled both without and with internet via computers and mobile smartphones using Turkish voice commands and touch buttons. In the first study based on STM32F407, the robotic vehicle was controlled by computer-based button and voice commands over Bluetooth, and a Tkinter-based user interface was created accordingly. To detect voice commands without internet, firstly, Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCC) were used in feature extraction and Dynamic Time Warping (DTW) method was used in matching and decision-making process for the correct recognition of 5 Turkish commands in computer environment. Samples for 5 voice commands were taken from 15 participants and the method used was tested. The results showed that 5 voice commands were recognized with 100% accuracy. Then, STM32F407-based smartphone and Bluetooth-based control work was discussed, and a Google assistant-based mobile interface was designed for voice commands. The third and fourth studies include the controls of the vehicle over Bluetooth and Wi-Fi connections, respectively, using the NodeMCU board. An Arduino IoT Cloud-based interface was developed for IoT-based control. Real-time studies with 10 participants showed that all control methods based on STM32F407 and NodeMCU boards work successfully.

Keywords: Robotic vehicle control, voice command recognition, dynamic time warping, STM32F407, nodeMCU

ToCite: ACUN, M. F., DALDAL, M., & AVCI, K. (2023). STM32F407 VE NODEMCU ESP8266 KARTLARI KULLANARAK KABLOSUZ ÇOK YÖNLÜ KONTROLLÜ ROBOTİK ARAÇ SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 1030-1049.

GİRİŞ

Bir dizi mekanik, elektronik ve yazılım bileşenlerinden oluşan robot araçlar, belirli görevleri yerine getirmek üzere tasarlanmış otomatik cihazlardır. Uzaktan kablosuz kontrol edilebilme özelliği, robot araçların tehlikeli ortamlarda kullanım, araştırma ve keşif, kurtarma operasyonları, güvenlik ve savunma, uzay araştırmaları, tıp ve sağlık gibi birçok farklı alan ve sektörde önemli roller üstlenebilmelerine olanak sağlamaktadır.

Robot araçların kablosuz kontrol edilmelerinde genellikle Bluetooth, RF ve Wi-Fi kablosuz iletişim teknolojileri kullanılmaktadır. Kontrol işlemleri ise düğmeler, kollar, joystickler gibi fiziksel arayüzler, dokunmatik butonlar, konuşma sesi, beyin dalgaları, göz izleme veya kas kullanılarak yapılmaya çalışılmaktadır. Bilgisayar veya mobil akıllı telefon aracılığıyla yapılan kontrol işlemlerinde, grafiksel kullanıcı arayüzlerde oluşturulan dokunmatik butonlarla kontrol veya konuşma sesiyle kontrol en yaygın karşılaşılan robot araç kontrol türleridir. Bu iki kontrol türü arasında uygulama başarımı daha zor olan konuşma sesiyle kontrol işlemlerinde ise belirgin olarak dört tanıma yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar örüntü tanıma, saklı Markov modelleri (Hidden Markov Model – HMM), dinamik zaman bükmesi ve sinir ağları yöntemleridir (Doğan,1999).

Robot araçların uzaktan kablosuz kontrolüyle ilgili çalışmalar incelendiğinde, literatürde bilgisayar ve mobil akıllı telefon tabanlı birçok kontrol türünde çalışmanın yapıldığı görülmüştür. Google Scholar, Scopus, Web of Science, ACM Digital Library ve IEEE xplore bilimsel veri tabanları taranarak elde edilen bu çalışmalar içerisinde ise İngilizce, Türkçe ve Arapça dillerinde sesli komutlarla kontrol üzerine yapılan çalışmaların sayıca daha fazla olduğu gözlemlenmiş ve aşağıda özetlenmiştir.

Literatürde Türkçe sesli komut kullanarak yapılan uzaktan kontrollü robotik araç çalışmaları şu şekilde özetlenebilir: Edizkan vd., çalışmalarında Ortak Vektör Yaklaşımı (OVY) tabanlı ses komut tanıma sistemi ile gezgin araç kontrolü gerçekleştirmişlerdir (Edizkan vd., 2007). Gezgin araç kontrolünde kişisel bilgisayar, Giriş/Çıkış kartı, RF alıcı/verici ve gezgin araç kullanmışlardır. Gezgin araç, ‘ileri’, ‘geri’, ‘sağa dön’, ‘sola dön’ ve ‘dur’ ses komutlarıyla kontrol edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada, OVY ile kişiye bağımlı ses komut tanımada yüksek başarımlar elde edilmiş olup gezgin araç kısmıyla ilgili herhangi bir bilgiye çalışmada yer verilmemiştir. Baltacıoğlu, tez çalışmasında bilgisayar üzerinden sesle veya klavye ile kontrol edilebilen, RF haberleşme yöntemi ile kablosuz olarak iletişim kurulabilen ve görüntü aktarımı yapabilen bir robot tasarlayıp, gerçekleştirmiştir (Baltacıoğlu, 2010). Çalışmada ses ile yönlendirme işlemi için Microsoft ses tanıma kütüphanesi kullanılmış ve 5 farklı İngilizce komut seçilmiştir. Robot üzerindeki kontrol işlemleri PIC16F877A mikrodenetleyicisi ile sağlanmıştır. Çelebi tarafından yürütülen tez çalışmasında, bir ses komutu tanıma sistemi kullanılarak gezgin araç kontrolü gerçekleştirilmiştir (Çelebi, 2012). Bu sistemde, öznitelik çıkarmada Mel-Frekansı Kepstrum Katsayıları (Mel Frequency Cepstral Coefficients - MFCC) yöntemi kullanılmış ve eşleştirme ile karar verme aşamalarında Vektör Nicemleme (VN) yaklaşımı benimsenmiştir. Tüm işlemler Matlab yazılım ortamında gerçekleştirilmiş ve gezgin aracın ‘ileri git’, ‘geri git’, ‘sağa dön’, ‘sola dön’ ve ‘dur’ gibi komutlarla kontrolü sağlanmıştır. Ses komutları bilgisayar tarafından tanındıktan sonra, elde edilen komut bilgileri radyo frekansları aracılığıyla gezgin araca iletilmiştir. Gürültüsüz ve gürültülü ortamlarda yapılan deneyler sonucunda, sırasıyla %96 ve %68 başarı oranları elde edilmiştir. Gündoğdu ve Çalhan, yatağa bağımlı olan veya tekerlekli sandalyeye bağımlı olup elini kullanamayan engelli bireyler için ses denetimli bir araç tasarlamışlardır (Gündoğdu ve Çalhan, 2013). Tasarlanan aracın ‘ileri’, ‘geriye’, ‘sağa’, ‘sola’ ve ‘dur’ ses komutları ile kontrol edilmesi sağlanmıştır. Çalışmada, ses kartını kontrol edebilmek ve ana kontrol ünitesi ile gerekli veri alışverişini sağlayabilmek için iki adet PIC16F628A mikrodenetleyici kullanılmıştır. Çalışmada seslerin tanınmasında kullanılan algoritmalar ve dayandıkları yöntemlerden bahsedilmemiştir. Gündoğdu ve Yücedağ, üzerinde bir robot kol bulunan bir mobil araç tasarımı gerçekleştirmiş ve bu mobil aracın ve robot kolun hem arayüz hem de ses komutları ile kontrol edilmesini sağlamışlardır (Gündoğdu ve Yücedağ, 2013). Ses kontrol için ‘ileri’, ‘geriye’, ‘sağa’, ‘sola’, ‘dur’, ‘nesneyi al’, ‘nesneyi bırak’ ve ‘orta kamera’ ses komutları belirlenmiştir. Kablosuz iletişim için ise 433 MHz RF haberleşme alıcı verici modüller kullanılmıştır. Kontrol kartı için PIC16F628A mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Yapılan test sonuçlarından, ses komutları ile kontrol sisteminin, arayüz ile kontrol sistemine göre daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Aras vd., beş farklı sesli yön komutunun (‘sağa’, ‘sola’, ‘ileri’, ‘geri’ ve ‘dur’) gerçek zamanlı olarak tanınması işlemi Matlab yazılım ortamında gerçekleştirmişlerdir (Aras vd., 2014). MFCC ve Doğrusal Öngörülü Kodlama (Linear Prediction Coefficients - LPC) katsayıları kullanılarak öznitelikler elde edilmiş ve eğitim verisi oluşturulmuştur. Sonrasında ise k-En Yakın Komşu sınıflandırma algoritması kullanılmıştır. Sonuçlar hatalı algılamaların tamamının ‘İleri’ ve ‘Geri’ komutlarının karıştırılmasıyla ortaya çıktığını göstermiştir. Her iki komutta da üç harfin (‘eri’) benzer olmasının, algılamayı zorlaştırdığı belirtilmiştir. İskender vd., Arduino Mega kartı ve Bluetooth sensör kullanılarak akıllı telefon üzerinden sesli komutlarla kontrol edilebilen bir araç yapmışlardır

(İskender vd., 2017). Sesli komutlar için Google Voice ve VoiceBot uygulaması kullanmışlardır. Çalışmada hangi komutların kullanıldığı belirtilmemiştir.

Bunlar dışında, yerli araştırmacıların Türkçe dışında sesli komutlar kullanarak yaptıkları çalışmalar da bulunmaktadır. Vatansver ve Kuşçu, bir robotu ve onun önünde yer alan kamerayı uzaktan ses komutlarıyla kontrol eden bir menü kontrol düzeni geliştirmişlerdir (Vatansver ve Kuşçu, 2016). Robot kontrolü için ‘go forward’ (ileri git), ‘back’ (geri), ‘turn left’ (sola dön), ‘turn right’ (sağa dön), ‘stop’ (dur) ve kamera kontrolü için ‘the camera down’ (kamera aşağı), ‘the camera up’ (kamera yukarı) ve ‘the camera middle’ (kamera ortaya) ses komutlarını kullanmışlardır. Ses tanıma için EasyVR modülü, kablosuz haberleşme için Zigbee ve kontrol işlemleri için ise Arduino Uno kartı kullanmışlardır. Selvi vd., akıllı telefonda AMR Voice olarak isimlendirilen Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı kameralı bir robotik araç geliştirmişlerdir (Selvi vd., 2021). Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa), ‘stop’ (dur) ve ‘keep watch in all direction’ (her yönü izle) komutları kullanılmıştır.

Yabancı araştırmacılar tarafından İngilizce sesli komut kullanarak yapılan uzaktan kontrollü robotik araç çalışmaları ise şu şekilde özetlenebilir: Rasal, engelli bireylere yönelik sözlü komutlarla veya insan bilgisayar arayüzü ile kontrol edilen mikrodenetleyici tabanlı bir robotik araç sistemi önermiştir (Rasal, 2014). Araçta oturan engelli bir kişi sözlü komutlar vererek aracı kontrol edebilir. Eğer kişi daha fazla kontrol edemiyorsa sözlü komutlar kullanarak veya kullanıcı arayüzü kullanarak doğrudan baz istasyonundan kontrol edilebilir. Sesli komut olarak 7 İngilizce komut kullanılmıştır. Bunlar ‘go forward’ (ileri git), ‘go backward’ (geri git), ‘turn left’ (sola dön), ‘turn right’ (sağa dön), ‘seat belt tightening/loosening’ (emniyet kemerini sıkma/ gevşetme), ‘horn control’ (korna kontrolü) ve ‘stop’ (dur) komutlarıdır. Çalışmada ses tanıma işlemi için öznitelik olarak MFCC ve eşleştirme yöntemi olarak DTW kullanılmıştır. Kannan ve Selvakumar, sesle kontrol edilen servo motor tabanlı yürüyen bir robot tasarlamışlardır (Kannan ve Selvakumar, 2015). Ses algılama için EasyVR modülü, kablosuz haberleşme için Zigbee teknolojisi ve kontrol işlemi için ise ATmega 2560 mikrodenetleyici tabanlı Arduino Mega kartı kullanmışlardır. Çalışma için 7 İngilizce ses komutu seçilmiştir. Bunlar ‘forward’ (ileri), ‘back’ (geri), ‘right’ (sağa), ‘left’ (sola), ‘load’ (yükle), ‘release’ (serbest bırak) ve stop (dur) ses komutlarıdır. Rashid vd., Bluetooth üzerinden akıllı cep telefonu tarafından sesli kontrol edilen bir robot çalışması yapmışlardır (Rashid vd., 2017). Kontrol işlemleri için Arduino Uno kartı kullanılmış olup, sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘autonomous’ (otonom) komutları ele alınmıştır. Burada ‘autonomous’ komutu ile robotun herhangi bir engelle çarpmadan otonom olarak hareket etmesi amaçlanmıştır. Pinjarkar vd., Android özellikli akıllı telefonda Bluetooth üzerinden bir robotu sesli kontrol edebilmek için bir uygulama yazılımı geliştirmişlerdir (Pinjarkar vd., 2017). Kontrol işlemleri için AT89S52 mikrodenetleyicisi, sesli komut olarak ise ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) komutlarını kullanmışlardır. Ses tanıma işlemleri akıllı telefon üzerinden yapılmış ama nasıl yapıldığı çalışmada belirtilmemiştir. Chikhale vd., Android özellikli akıllı telefonda Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç geliştirmişlerdir (Chikhale vd., 2017). Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa), ‘stop’ (dur), ‘camera’ (kamera - 180 derece döndürmek için), ‘hold’ (tut – robot kolunun nesneyi tutması için) ve ‘drop’ (bırak-robot kolunun nesneyi bırakması için) komutlarını kullanmışlardır. Akıllı telefon üzerinden yapılan ses tanıma işlemlerinin nasıl yapıldığı çalışmada belirtilmemiştir. Harika vd., akıllı telefonda Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Raspberry Pi Zero tabanlı bir robotik araç geliştirmişlerdir (Harika vd., 2018). Sistemin ses algılama doğruluğu yaklaşık %95 olup, 1-2 saniye sonra robotik sistem ses komutunu icra etmiştir. Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa), ‘leftspin’ (sola dönme), ‘rightspin’ (sağa dönme) ve ‘stops’ (dur) komutlarını kullanmışlardır. Akıllı telefon üzerinden yapılan ses tanıma işlemlerinin nasıl yapıldığı çalışmada belirtilmemiştir. Ullah vd., el hareketleri, dokunmatik tuş ve ses tanıma kullanarak Arduino Uno tabanlı bir robot arabayı kontrol etmeye çalışmışlardır (Ullah vd., 2019). Elin hareketine ve pozisyonuna göre yapılan el hareketleri ile kontrol işleminde, üzerine Arduino Nano yerleştirilen bir eldiven ve kablosuz iletişim için ise RF verici-alıcı modülleri kullanılmıştır. Dokunmatik tuş ve sesle tanıma ile kontrol işleminde ise, akıllı telefonda bir mobil uygulama kullanılmıştır. Kablosuz iletişim Bluetooth üzerinden sağlanmıştır. Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘brake’ (fren) komutları kullanılmıştır. Sachdev vd., NodeMCU ESP8266 kartı kullanarak nesnelerin interneti tabanlı bir araç kontrol işlemi geliştirmişlerdir (Sachdev vd., 2020). Bulut sistemi olarak Adafruit kullanılmış, ses komutları ise Google asistan kullanılarak algılanmıştır. Sesli komut olarak ‘go forward’ (ileri git), ‘go backward’ (geri git), ‘go left’ (sola git), ‘go right’ (sağa git) ve ‘shutdown’ (kapat) komutları kullanılmıştır. Saravanan vd., Bluetooth üzerinden Android özellikli akıllı telefonda bir arayüz oluşturarak sesli komutlarla veya dokunmatik butonlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç geliştirmişlerdir (Saravanan vd., 2020). Aracı kontrol etmek için Google Play Store’da bulunan ve MIT AI2 Companion olarak bilinen

uygulamayı kullanmışlardır. Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) komutları çalışmada kullanılmıştır. Timsina vd., akıllı telefonda Google asistan kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Timsina vd., 2020). Çalışmayla ilgili herhangi komut seti ve şekil verilmemiştir. Verma vd., akıllı telefonda AMR-Voice Android uygulaması kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Verma vd., 2020). Çalışmayla ilgili ses tanıma başarımları oranı %76 bulunmuştur. Srivastava ve Singh, akıllı telefonda Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Srivastava ve Singh, 2020). Çalışmayla ilgili herhangi komut seti verilmemiştir. Karthik vd., akıllı telefonda Google konuşma tanıma sistemini kullanarak Firebase bulut sistemi ve Wi-Fi üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen NodeMCU tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Karthik vd., 2020). Sesli komut olarak çalışmada ‘slow/fast forward’ (yavaş/hızlı ileri), ‘slow/fast backward’ (yavaş ve hızlı geri), ‘slow/sharp left’ (yavaş ve keskin sola), ‘slow/sharp right’ (yavaş ve keskin sağa), zigzag (zıgzak) ve stop (dur) komutları kullanılmıştır. Çalışmada ses tanımayla ilgili herhangi bir başarımları oranı verilmemiştir. Kumar ve Rao, akıllı telefonda Google asistan kullanarak Adafruit IO bulut sistemi ve Wi-Fi üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen ESP32 tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Kumar ve Rao, 2020). Sesli komut olarak sadece ‘forward’ (ileri) ve ‘backward’ (geri) komutlarından bahsedilmiştir. Andrew vd., akıllı telefonda Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden 4 İngilizce sesli komutla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Andrew vd., 2021). Kullanılan sesli komutlar şunlardır: ‘Move ahead’ (ileriye hareketle), ‘move backward’ (geriye hareketle), ‘turn left’ (sola dön) ve ‘turn right’ (sağa dön). Gupta vd., akıllı telefonda Google asistan kullanarak ThingSpeak bulut sistemi ve Wi-Fi üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen ESP32 tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Gupta vd., 2020). Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘in reverse’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) komutları kullanılmıştır. Chakraborty vd., akıllı telefonda AMR Voice olarak isimlendirilen Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Mega tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Chakraborty vd., 2021). Sesli komut olarak ‘go forward’ (ileri git), ‘go back’ (geri git), ‘go left’ (sola git), ‘go right’ (sağa git) ve ‘stop’ (dur) komutları kullanılmıştır. Chandelker vd., akıllı telefonda Google konuşma sistemi temelli AMR Voice olarak isimlendirilen Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Chandelker vd., 2021). Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘back’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa), ‘stop’ (dur) ve ‘rotation’ (dönüş) komutlarını kullanmışlardır. Bharani, robotik tekerlek ve kolu akıllı telefonda AMR Voice uygulama yazılımını kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol eden Arduino Uno tabanlı bir araç gerçekleştirmiş (Bharani, 2021). Sesli komut olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa), ‘up’ (yukarı), ‘down’ (aşağı), ‘open’ (aç), ‘close’ (kapat) ve ‘stop’ (dur) komutlarını kullanmıştır. Shah, bilgisayar kontrollü Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmiş (Shah, 2021). Kablosuz haberleşme 433 MHz RF modülleriyle sağlanmıştır. Kontrol işlemleri ses, manuel tuş takımı ve metin komutlarıyla yapılmıştır. Sesli komutlar, windows işletim sistemindeki dahili konuşma tanıma uygulamasıyla %75 doğrulukla yapılmıştır. Kontrol komutları olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) kullanılmıştır. Manwani vd., 433 MHz RF modülleriyle bilgisayardan sesli kontrol edilen Arduino Uno tabanlı dört tekerlekli bir robotik araç gerçekleştirmiş (Manwani vd., 2022). Sesli komutlar, Windows işletim sistemindeki dahili konuşma tanıma uygulamasıyla yapılmıştır. Kontrol komutları olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) kullanılmıştır. Khawate vd., akıllı telefonda Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden 7 İngilizce sesli komutla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Khawate vd., 2022). Sesli komutlar olarak ‘forward’ (ileri), ‘reverse’ (geri), ‘turn left’ (sola dön), ‘turn right’ (sağa dön), ‘go left’ (sola git), ‘go right’ (sağa git) ve ‘stop’ (dur) kullanılmıştır. Sissodia vd., akıllı telefonda Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Sissodia vd., 2023). Sesli komutlar için Google Voice Search programı kullanılmış olup bu sesli komutlar şunlardır: ‘Forward’ (İleri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur). Pal vd., akıllı telefonda MIT APP Inventor tabanlı Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Pal vd., 2023). Sesli komutlar için Google’ın konuşma tanıyıcı modeli kullanılan sistemde ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) komutları kullanılmış ve ses tanıma başarımları oranı %90 bulunmuştur. Kuriakose vd., akıllı telefonda AMR-Voice Android uygulaması kullanarak Bluetooth üzerinden sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Kuriakose vd., 2023). Kontrol komutları olarak ‘forward’ (ileri), ‘backward’ (geri), ‘left’ (sola), ‘right’ (sağa) ve ‘stop’ (dur) komutları kullanılmıştır.

Arapça sesli komut kullanarak yapılan uzaktan kontrollü robotik araç çalışmaları ise şu şekilde özetlenebilir: Abed ve Jasim, bir mobil robotun Arapça ses komutlarıyla uzaktan kontrol edilmesi için öznitelik olarak MFCC ve

eşleştirme için DTW tabanlı bir konuşma tanıma sistemi sunmuşlardır (Abed ve Jasim, 2016). Bilgisayarda Matlab yazılım platformunda tanıma işlemleri yapılmış ve kontrol işlemleri için PIC18F45K22 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Sesli konuşma komutları olarak 'ileri', 'geri', 'sağa', 'sola' ve 'dur' kelimelerinin Arapça karşılıkları kullanılmıştır. Kablosuz bağlantı özelliği, kablosuz mikrofon seti ve bilgisayar arasında kullanılmıştır. Bilgisayar ve robot arasında ise RS232 kablolu bağlantı kullanılmıştır. Khan vd., akıllı telefonda MitAppInventor2 ile oluşturulan Android bir uygulama kullanarak Bluetooth üzerinden Arapça ve İngilizce sesli komutlarla kontrol edilen Arduino Uno tabanlı bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Khan vd., 2021). Sesli komut olarak Arapça ve İngilizce 'forward' (ileri), 'backward' (geri), 'left' (sola), 'right' (sağa) ve 'stop' (dur) komutları kullanılmıştır. Mnassri vd., Arapça temelli olarak engellilere yardımcı olması için Raspberry pi kartı tabanlı gerçek zamanlı otomatik ses tanıma sistemi gerçekleştirmişlerdir (Mnassri vd., 2022). Bu çalışmada göreceli spektral-algısal doğrusal tahmin ve ayrık dalgacık dönüşümü yöntemleri; konuşma sinyallerinin tanınması, işlenmesi ve sınıflandırılması için kullanılmıştır. Bu yaklaşım, Destek Vektör Makinesi algoritmasına dayalı ses tanıma sisteminin performansını gürültüsüz bir ortamda %100 ve gürültülü bir ortamda yaklaşık %98'lik bir tanıma oranına ulaştırmıştır. Sesli komut olarak Arapça şu 10 komut kullanılmıştır: 'ileri', 'hızlı ileri', 'hızlan', 'sola', 'sağa', 'dön', 'dur', 'geri', 'hızlı geri' ve 'devam'.

Robotik araç kontrolünde kullanılan yöntemlerin benzerleri, farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Çubukçu vd., konuşma tanıma tabanlı uzaktan kontrollü ev otomasyonu sistemi önermişlerdir (Çubukçu vd., 2015). Matlab ortamında ses tanıma işlemleri gerçekleştirmiş olup, öznelik çıkartma yöntemi olarak MFCC ve öznelik eşleştirme yöntemi olarak Dinamik Zaman Bükmesi (Dynamic Time Warping - DTW) kullanmışlardır. Çalışmada 'Işıkları Aç', 'Işıkları Kapat' ve 'Kettle Aç' ses komutları kullanılmıştır. Kablosuz iletişim olarak Zigbee teknolojisi kullanılmıştır. Dutta vd., Arduino Uno tabanlı tekerlekli bir sandalyeyi Bluetooth üzerinden Android özellikli akıllı telefonda sesle kontrol etmek için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (Dutta vd., 2020). Sesli komut olarak 'move forward' (ileri hareket et), 'move backward' (geri hareket et), 'turn left' (sola dön), 'turn right' (sağa dön) ve 'stop' (dur) komutlarını kullanmışlardır. Ioana ve Vaduva, 9 İngilizce ses komutuyla kontrol edilen dört tekerlekli bir robot köpek gerçekleştirmişlerdir (Ioana ve Vaduva, 2022). Pinler yeterli olmadığı için çalışmada Arduino Nano ve Arduino Uno kartları birlikte kullanılmıştır. Robotun hareketleri 9 adet servo motor (8 adet bacak ve 1 adet kuyruk için) ve 4 adet DC motor (her tekerlek için bir adet) aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sesli komutlar, doğrudan Arduino Nano 33 BLE Sense üzerinde çalışan bir model kullanılarak ayrıştırılmıştır. Model, ses kayıtlarından oluşan bir veri kümesinden çıkarılan MFCC özellikleriyle eğitilmiş derin bir sinir ağını temel almıştır. Kullanılan sesli komutlar şunlardır: 'Hello Bobbert' (Merhaba Bobbert), 'forward' (ileri), 'backward' (geri), 'left' (sola), 'right' (sağa), 'stop' (dur), 'sit' (otur), 'down' (aşağı), 'good boy' (iyi çocuk). Siddesh vd., Wi-Fi üzerinden kontrol edilen NodeMCU tabanlı ESP32 Cam kamera modüllü bir robotik araç gerçekleştirmişlerdir (Siddesh vd., 2023). Sistemde sesli komutlar kullanılmamış, kullanılan arayüz ve komutlarla ilgili bir bilgi verilmemiştir.

Yukarıda verilen literatür çalışmaları incelendiğinde, çok yönlü robotik kontrol çalışmalarının çok az sayıda olduğu ve kullanılan kart olarak sınırlı özelliklere sahip Arduino Uno tercih edildiği, Türkçe sesli komutlar ile robotik araç kontrolünde ise genelde PIC mikrodenetleyicilerin ve Arduino temel klasik kartların kullanıldığı, ayrıca İngilizce sesli komutlar için kullanılan MFCC ve DWT yöntemlerinin Türkçe ses komut tanımada birlikte kullanılmadığı görülmektedir. Bu motivasyonla Türkçe sesli komutlar ve kullanıcı arayüzdeki dokunmatik butonlar kullanılarak robotik bir aracın bilgisayar ve mobil akıllı telefonlarla internetsiz ve internetli olarak kontrol edilmesi hedeflenmiştir. Sistemin kontrol işlemlerini gerçekleştirmek üzere bu çalışmada, sesle ilgili yüksek performans uygulamaları için kullanım alanı bulan STM32F407 geliştirme kartı ve nesnelerin interneti projeleri için iyi bilinen NodeMCU geliştirme kartı kullanılmıştır. Türkçe sesli komutlarla robotik araç kontrol çalışmalarında STM32F407 ve NodeMCU geliştirme kartlarının ilk kez kullanımı ve Türkçe sesli komutları algılama ve yönlendirme işlemlerinin çok yönlü yapılması, bu çalışmanın mevcut benzer çalışmalardan farkını ortaya koymaktadır. Makalenin devamı şu şekilde düzenlenmiştir: İkinci bölüm, çalışmada kullanılan donanımsal ve yazılımsal araçların yanı sıra kullanılan yöntemlere dair genel bilgiler sunmaktadır. Üçüncü bölüm, tasarlanan aracın kontrol süreçlerini ve elde edilen bulguları içermektedir. Son bölüm ise çalışmanın temel sonuçlarını özetlemekte, ayrıca gelecekte yapılabilecek çalışmalara dair öneriler sunmaktadır.

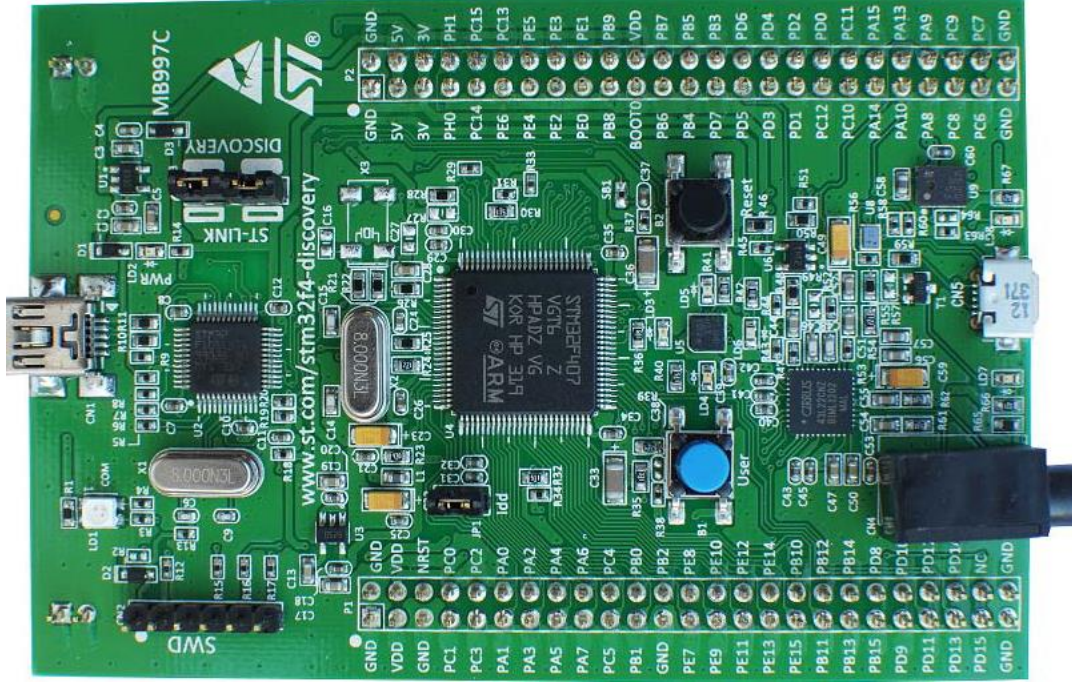
MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, çalışmada kullanılan donanımsal ve yazılımsal araçlar ile MFCC ve DTW yöntemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Donanımsal Araçlar

STM32F407VG Geliştirme Kartı

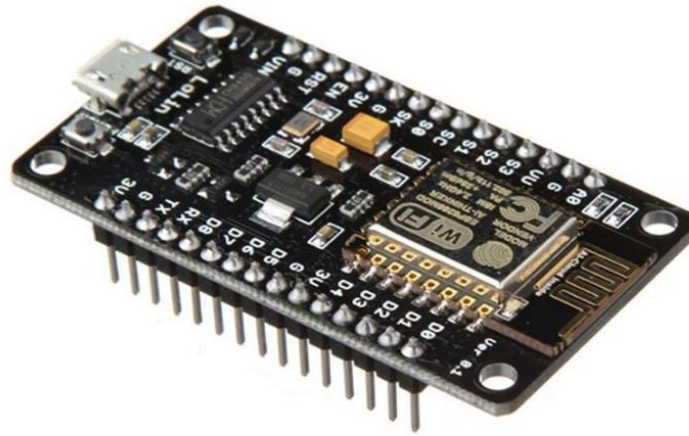
STM32F407VG geliştirme kartı (Şekil 1), 168 MHz'e kadar frekansta çalışan yüksek performanslı Arm® Cortex®-M4 32 bit RISC çekirdeğini temel alan STMicroelectronics firmasına ait bir geliştirme kartıdır. Dahili mikrofonu olması ve güçlü bir mimariye sahip olmasından dolayı ses işleme veya konuşma tanıma işlemlerinde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kartla ilgili daha fazla ayrıntı için ürün resmi sitesinden bakılabilir (STM32F407VG, 2023).



Şekil 1. STM32F407VG Geliştirme Kartı

NodeMCU v3 Geliştirme Kartı

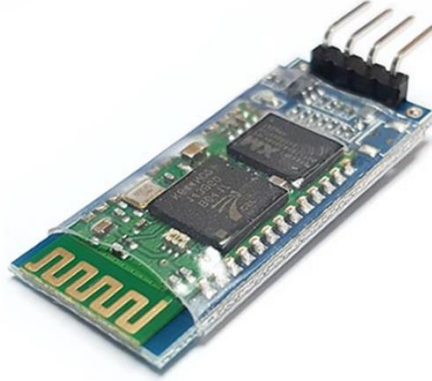
NodeMCU v3 geliştirme kartı (Şekil 2), dahili Wi-Fi ve Derin Uykuda Çalışma özelliklerine sahip yüksek işlem gücü nedeniyle nesnelerin interneti uygulamalarında tercih edilen açık kaynak kodlu ve küçük boyutlu bir elektronik geliştirme kartıdır. Bu kart, 80 MHz ila 160 MHz arasında ayarlanabilir saat frekansında çalışan Tensilica Xtensa 32-bit LX106 RISC mikroişlemcisine sahip ESP8266 yongasını içeren ESP-12E modülü ile birlikte gelir. NodeMCU, veri ve programları depolamak için 128 KB RAM ve 4MB Flash belleğe sahiptir.



Şekil 2. NodeMCU v3 Geliştirme Kartı

HC-06 Bluetooth Modülü

HC-06 Bluetooth Modülü (Şekil 3), 2.4GHz frekansında çalışan ve açık alanda yaklaşık 10 metrelik bir haberleşme mesafesine sahip Bluetooth 2.0 destekli bir karttır. HC-06 Bluetooth modülü sadece slave (bağımlı) olarak çalışmaktadır. Dolayısıyla yalnızca kendine gelen bağlantı isteklerini cevaplayabilmekte, bir bağlantıyı başlatamamaktadır.



Şekil 3. HC-06 Bluetooth Modülü

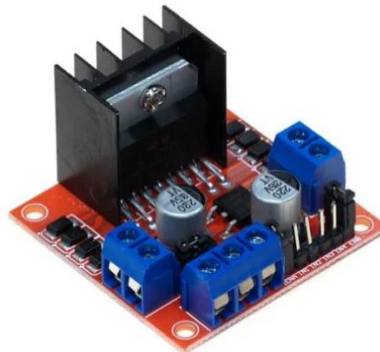
DC Motor ve L298N Motor Sürücüsü

Uygun fiyatı ve kullanılabilirliği nedeniyle basit robotik uygulamalarda en çok kullanılan motor plastik redüktörlü DC motordur (Şekil 4). Motorda iki farklı noktadan mil çıkışı bulunmaktadır, bu nedenle hem sağ hem de sol kullanımlar için uygundur. Bu çalışmada, arka iki tekerleği hareket ettirmek için iki adet dc motor kullanılmıştır.



Şekil 4. 6V Plastik Redüktörlü DC Motor

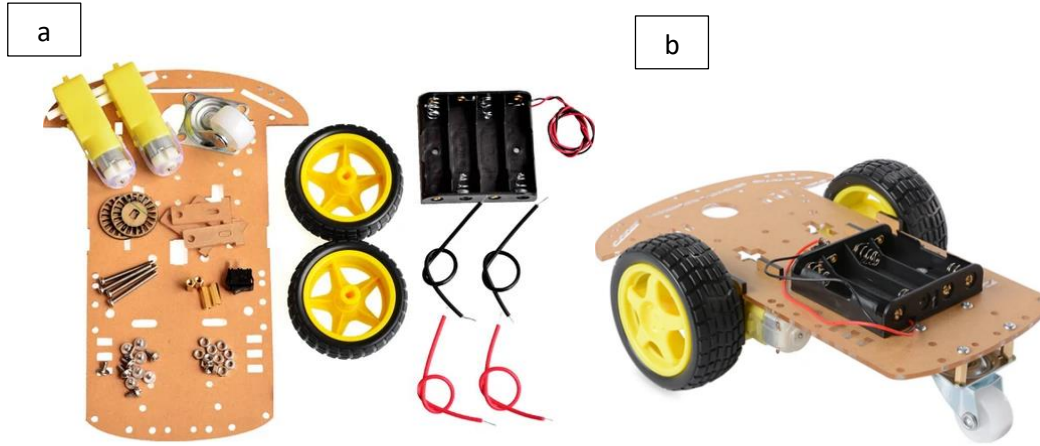
L298N Motor Sürücü Modülü (Şekil 5), DC ve Step Motorları sürmek için yüksek güçlü bir motor sürücü modülüdür. Bu modül L298 motor sürücü entegresi ve 78M05 5V regülatörden oluşmaktadır. Bu motor sürücü kartı, 24V'a kadar olan motorları sürmek amacıyla tasarlanmıştır. İki ayrı kanala sahip olan kart, her bir kanal için 2A akım sağlayabilmektedir. Bu çalışmada iki adet sürücü kartı kullanılmıştır.



Şekil 5. L298N Motor Sürücüsü

Robotik Araba Kiti

Robotik araba oluşturmak için kullanılacak kit içerisinde delikleri hazır şeffaf bir şase, iki tekerlek, 6 V çıkış için 4'lü pil yuvası, sarhoş tekerlek ve vida seti bulunmaktadır (Şekil 6.a). Montaj tamamlandığında Şekil 6.b'deki araç elde edilmektedir.



Şekil 6. a. Robot Araba Kiti b. Kitin Montajı Yapıldıktan Sonraki Durumu

Yazılımsal Araçlar

Python

Öğrenme kolaylığı ve uygulama alanlarındaki gücüyle ön plana çıkan Python, verimli üst düzey veri yapılarına sahip nesne yönelimli bir programlama dilidir. Zarif sözdizimi, dinamik yazım özelliği, yorumlayıcı doğası ve kapsamlı standart kitaplığı; Python'u birçok alanda komut dosyası oluşturma ve hızlı uygulama geliştirme için ideal bir dil haline getirmektedir (Python, 2023). Python dili bu çalışmada, sistemin internet bağlantısına ihtiyaç duymadan DTW yöntemi ile ses tanıma gerçekleştirilmesinde kullanılmıştır.

PyCharm

PyCharm, Python'da programlama için kullanılan entegre bir geliştirme ortamıdır (PyCharm, 2023). Bu çalışmada, Python programlama dili kullanarak bilgisayarda yapılan işlemler bu platform kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tkinter

Tkinter, Python'un fiili standart GUI (Grafik Kullanıcı Arayüzü) paketidir (Tkinter, 2023). Bu çalışmada bilgisayar tabanlı robotik araç kontrolü için kullanıcı arayüzün tasarlanmasında bu paketten yararlanılmıştır.

Arduino IDE

Arduino uyumlu geliştirme kartları ve aynı zamanda 3. taraf çekirdekler ve satıcıların geliştirme kartları için program yazmak ve yüklemek için kullanılan, C ve C++ dilleri ile yazılmış entegre geliştirme ortamıdır. Uygulama yazılımına <https://www.arduino.cc/en/software> sitesinden erişim sağlanabilir. Bu çalışmada NodeMCU kartı için program oluşturma ve yükleme işlemleri için kullanılmıştır.

Arduino Cloud IoT

Arduino Cloud IoT, nesnelerin interneti (Internet of Things, IoT) projeleri oluşturmayı, dağıtmayı ve izlemeyi kolaylaştıran çevrimiçi bir platformdur. Arduino Cloud IoT, 2019 yılında açık kaynaklı donanım platformu olan Arduino tarafından oluşturulmuştur. Platformda proje oluşturma işlemleri <https://create.arduino.cc/iot/> sitesinden yapılmaktadır. Bu çalışmada, internet üzerinden NodeMCU geliştirme kartı tabanlı uzaktan kontrol ve izleme işlemleri için kullanılmıştır.

STM32CubeIDE

STM32CubeIDE, STM 32 mikrodenetleyicileri ve mikroişlemcileri için çevresel yapılandırma, kod oluşturma, kod derleme ve hata ayıklama özelliklerine sahip gelişmiş bir C/C++ geliştirme platformudur. Uygulama yazılımı

hakkında daha fazla bilgiye ve kurulum dosyasına <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> sitesinden erişilebilir. Bu çalışmada STM32F407 geliştirme kartını programlamak için kullanılmıştır.

MIT App Inventor

MIT App Inventor, Google tarafından başlatılan ve sonrasında Massachusetts Institute of Technology (MIT) tarafından sürdürülen bir web uygulaması entegre geliştirme ortamıdır. Bu platformla Android telefonlar, iPhone'lar ve Android/iOS tabletler için tamamen işlevsel uygulamalar oluşturulabilir. Uygulama oluşturma işlemleri <https://appinventor.mit.edu/> sitesi üzerinden yapılmaktadır. Bu çalışmada, dokunmatik butonlarla ve sesli komutlarla STM32F407 tabanlı akıllı telefon ve Bluetooth temelli robotik araç kontrol çalışması için mobil arayüz oluşturmada kullanılmıştır.

Donanımsal ve Yazılımsal Araçların Tercih Edilme Sebepleri

Bu çalışmada kullanılan donanım ve yazılımlar, literatürde yapılan bilimsel araştırmaların sonuçlarına dayanılarak seçilmiştir. STM32F407VG Geliştirme Kartı, yüksek performanslı işlem yetenekleriyle öne çıkar ve robotik çalışmalarda stabil ve güvenilir bir şekilde kullanılmıştır (Jiang vd., 2023). NodeMCU v3 Geliştirme Kartı, IoT projelerinde yaygın olarak tercih edilir ve kablosuz bağlantı seçenekleriyle projenin internet tabanlı kontrolünü destekler (Abd Jalil vd., 2021). HC-06 Bluetooth Modülü, düşük maliyetli ve yaygın olarak bulunabilen bir Bluetooth çözümüdür ve benzer projelerde başarıyla kullanılmıştır (Santhakumar vd., 2021).

Yazılım tarafında, Python programlama dili geniş kütüphane desteği ve hızlı prototipleme özellikleriyle tercih edilmiştir (Srinath, 2017). PyCharm, Python projelerinin geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir entegre geliştirme ortamıdır ve geliştirme sürecini kolaylaştırır (Nguyen, 2109). Tkinter, Python dilinin standart arayüz paketidir ve kullanıcı dostu bir kontrol panelinin oluşturulmasını sağlar (Moore, 2018). Arduino IDE, Arduino tabanlı projelerin geliştirilmesi için yaygın olarak tercih edilir ve geniş bir topluluk desteği bulunmaktadır. Arduino Cloud IoT, internet tabanlı kontrol seçenekleri sunarak projenin uzaktan erişimini mümkün kılar (Kurniawan ve Kurniawan, 2021). STM32CubeIDE, STM32 mikrodenetleyici tabanlı projelerin geliştirilmesi için önerilen bir IDE'dir ve yüksek performanslı işlem yetenekleri sunar (Ünsalan vd., 2022). MIT App Inventor, mobil uygulama geliştirmek için kullanıcı dostu bir platformdur (Top ve Gökbulut, 2022).

Mel-Frekans Kepstral Katsayıları (Mel Frequency Cepstral Coefficients-MFCC)

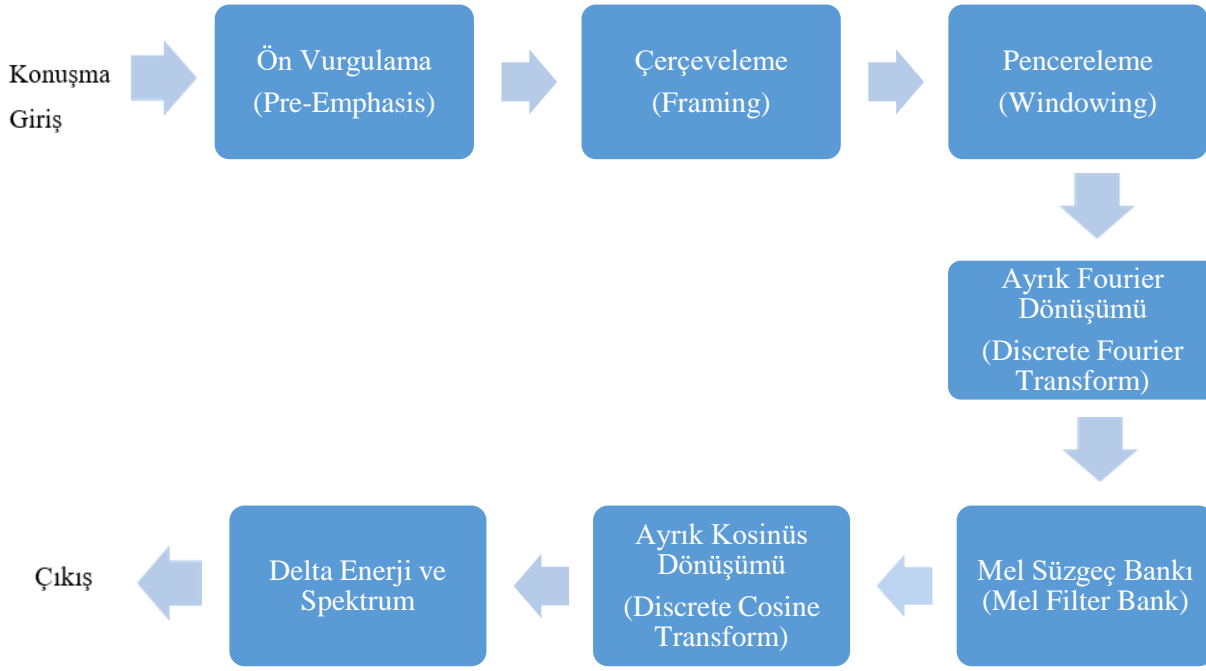
Mel-frekans ölçeği, insan kulağının ses frekanslarındaki değişimi algılayışını temsil eden bir ölçektir. 1000 Hz'e kadar olan seslerin algılanması doğrusal bir şekilde gerçekleşirken, frekans arttıkça değişimin algılanması logaritmik bir yapı kazanır. MFCC ise ses sinyalinin kısa-zamanlı güç spektrumunun Mel ölçeği üzerindeki temsilini ifade eder. Frekansın Mel ölçeğine dönüştürülmesi için kullanılan gerekli formül, (1) numaralı denklemde gösterilmiştir. Burada M , Mel ölçeği değerini temsil ederken f , Hertz cinsinden frekanstır. (Diğken ve İbrikçi, 2015).

$$M = 1125 \ln\left(1 + \frac{f}{700}\right) \quad (1)$$

Mel-Frekans Kepstral Katsayıları, ses işleme alanında özellikle konuşma tanıma ve müzik bilgi çıkarımı uygulamalarında öznitelik çıkarma yöntemi olarak kullanılan katsayılardır. Ses verisi alt kümelere bölünerek özellikler çıkarılır. Bu yöntemin aşamaları Şekil 7'de verilmiştir (Muda vd., 2010).

Ön vurgulama işleminde yüksek frekanslı sinyalin enerjisi artacak şekilde bir süzgeçten geçirilir. Çevreleme aşamasında, ses sinyalleri 20 ms ile 40 ms arasındaki aralıkta bir uzunluğa sahip olacak şekilde küçük parçalara bölünür. Pencereleme aşamasında, ses sinyali bir pencere fonksiyonu (Hamming) ile çarpılır. Dördüncü aşamada, zaman uzayındaki işaretler frekans uzayına dönüştürülür. Sonraki aşamada ise konuşma sinyalleri doğrusal ölçekte olmadığından, sinyaller Mel ölçeğe göre oluşturulmuş süzgeç bankından geçirilir. İşlem sonucunda logaritmik Mel spektrum elde edilir. Altıncı aşamada, Ayrık Kosinüs Dönüşümü kullanılarak logaritmik Mel spektrumu zaman uzayına dönüştürülür ve mel-frekans keppstrum katsayıları elde edilir. Son aşamada ise ses sinyali ve çerçevelerin değişim özelliği nedeniyle keppstral özelliklerin zaman içerisinde değişmesine ilişkin özellikler eklenir.

Bu çalışmada MFCC yöntemi, STM32F407 geliştirme kartı kullanarak Bluetooth üzerinden PC tabanlı robotik araç kontrolü çalışmasında sesli komutların tanınması işlemlerinde kullanılmıştır.



Şekil 7. MFCC Blok Diyagramı

Dinamik Zaman Bükmesi (Dynamic Time Warping - DTW)

Dinamik Zaman Bükmesi yöntemi, zaman içinde değişen iki konuşma sinyali arasındaki benzerliği değerlendirerek, verilen bir ses sinyalinin hangi konuşmacıya ait olduğunu tespit eder. Bu yöntem, iki sinyal arasındaki en uygun zaman eğrisini belirlemek amacıyla kullanılır. Aynı zamanda DTW, ses, video gibi çeşitli veri analizi alanlarında da kullanılan doğrusal bir tekniktir (Bakır, 2016).

Eşitlik 1 ve Eşitlik 2 içerisindeki Q ve C sembolleri, farklı iki konuşma sinyalini temsil ederken, n ve m sembolleri ise bu konuşma sinyallerinin uzunluklarını ifade eder.

$$Q = q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n \quad (2)$$

$$C = c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_m \quad (3)$$

Bu bağlamda, Q ve C sinyalleri arasındaki benzerlik oranı, Eşitlik 3'te olduğu gibi Öklid uzaklık yöntemiyle hesaplanır.

$$d(q_i, c_j) = (q_i - c_j)^2 \quad (4)$$

Q ve C için (i,j) indeksli bir matris oluşturulur. Bu matris kullanılarak birikmiş uzaklıklar matrisi hesaplanır. D, birikmiş maliyet matrisini ifade eder ve özyinelemeli bir şekilde hesaplanır. D(1,1), başlangıç uzaklığı olan d(1,1) değeriyle başlar.

$$D(i, j) = \min[D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)] + d(i, j) \quad (5)$$

Bu çalışmada DTW yöntemi, STM32F407 geliştirme kartı kullanarak Bluetooth üzerinden PC tabanlı robotik araç kontrolü çalışmasında sesli komutların tanınması işlemlerinde MFCC ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada MFCC ve DTW yöntemlerinin tercih edilme sebepleri ve var olan uygulamalara göre avantajları şu şekilde ifade edilebilir: İnsan işitmesinin özelliklerini yakalamak üzere tasarlanan MFCC yöntemi, ses dalgalarının frekans ve enerji bileşenlerini temsil ettiğinden dilin fonetik yapısını daha iyi yansıtarak sesli komutların doğru bir şekilde algılanmasına olanak sağlamaktadır. Sesli komutların karşılaştırılmasında kullanılan etkili bir yöntem olan DTW ise sesli komutların farklı hızlarda söylenmesi durumunda dahi benzerliklerini algılayabilme özelliğine sahiptir. Bu sayede, pratik kullanımlarda karşılaşılan değişken hız ve vurgu gibi faktörlerin üstesinden gelerek yüksek doğruluk sağlar. Bu yöntemler, mevcut benzer çalışmalara göre avantajlıdır çünkü dil bağımsızdır. Bu, farklı dillerdeki

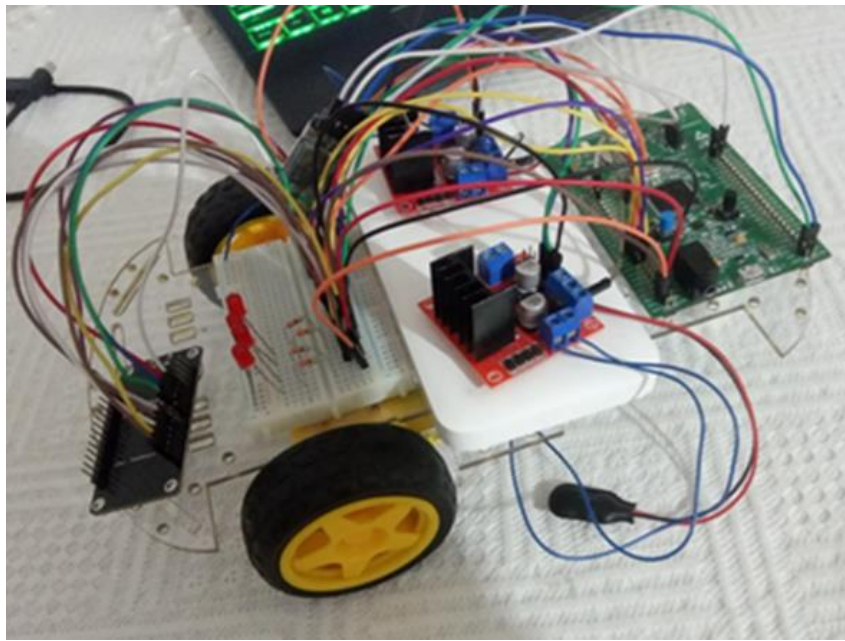
komutları da algılayabilme yetenekleri anlamına gelir. Ayrıca, gerçek zamanlı uygulamalar için hızlı işleme kabiliyetlerine sahip olmaları, kullanıcıların robotu hızlı ve doğru bir şekilde kontrol edebilmesini sağlar.

ÖNERİLEN KONTROL YÖNTEMLERİ VE BULGULAR

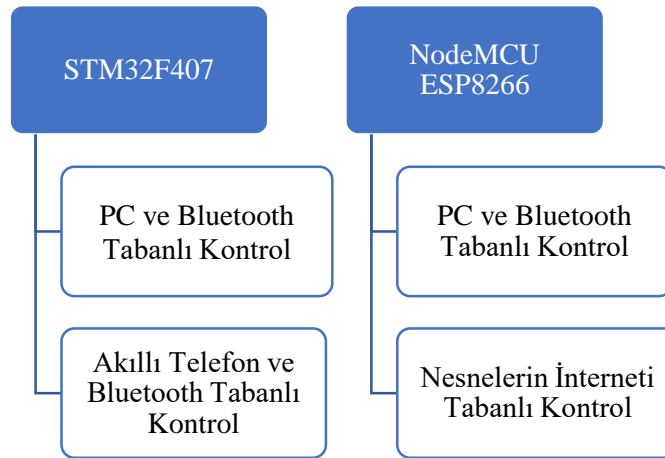
Bu bölümde, tasarlanan araç, onunla ilgili kontrol işlemleri ve elde edilen bulgular sunulmaktadır.

Tasarlanan Robotik Araç

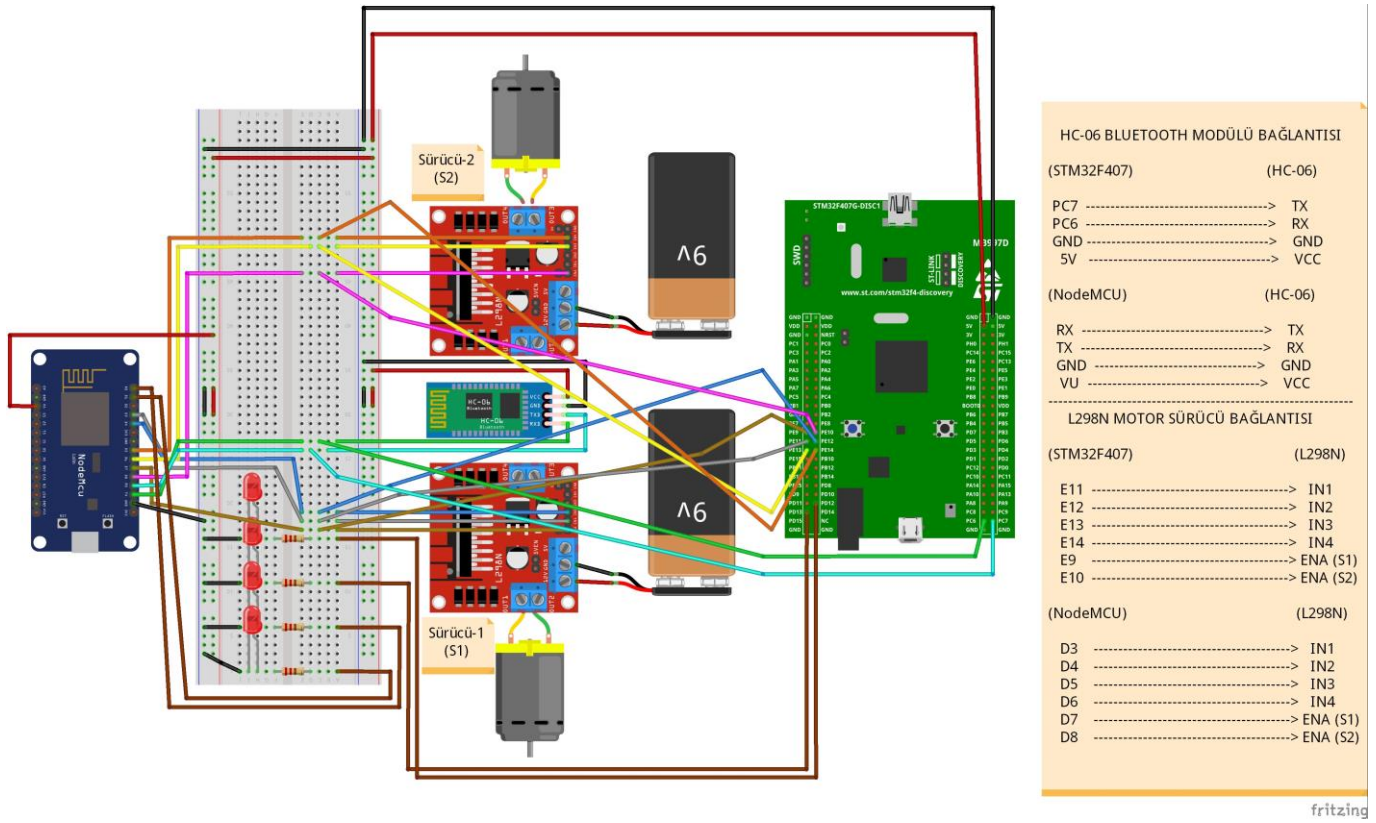
STM32F407 ve NodeMCU geliştirme kartları kullanarak oluşturulan üç tekerlekli robotik araç Şekil 8’de verilmiş olup, kullanılan her bir kart için oluşturulan kontrol yöntemi Şekil 9’da özetlenmiştir. Gerçekleştirilen sistemde, önceki bölümde anlatılan donanımsal araçlara ek olarak; her bir kontrol yönteminde farklı bir tanesi aktif olacak şekilde 4 adet LED ve LED akımlarını sınırlamak için 4 adet 220 ohm direnç ile birlikte elektrik bağlantı kabloları, devre tahtası, motor sürücü kartlarının güç beslemesi için 2 adet 9V pil ve geliştirme kartlarının güç beslemesi için bir adet taşınabilir şarj aleti de kullanılmıştır. Fritzing programı kullanarak gerçekleştirilen araca ait elektronik devre şeması Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 8. Tasarlanan Aracın Son Hali



Şekil 9. Tasarlanan Araç için Oluşturulan STM32F407 ve NodeMCU Kartları Tabanlı Kablosuz Robotik Araç Kontrol Çalışmaları

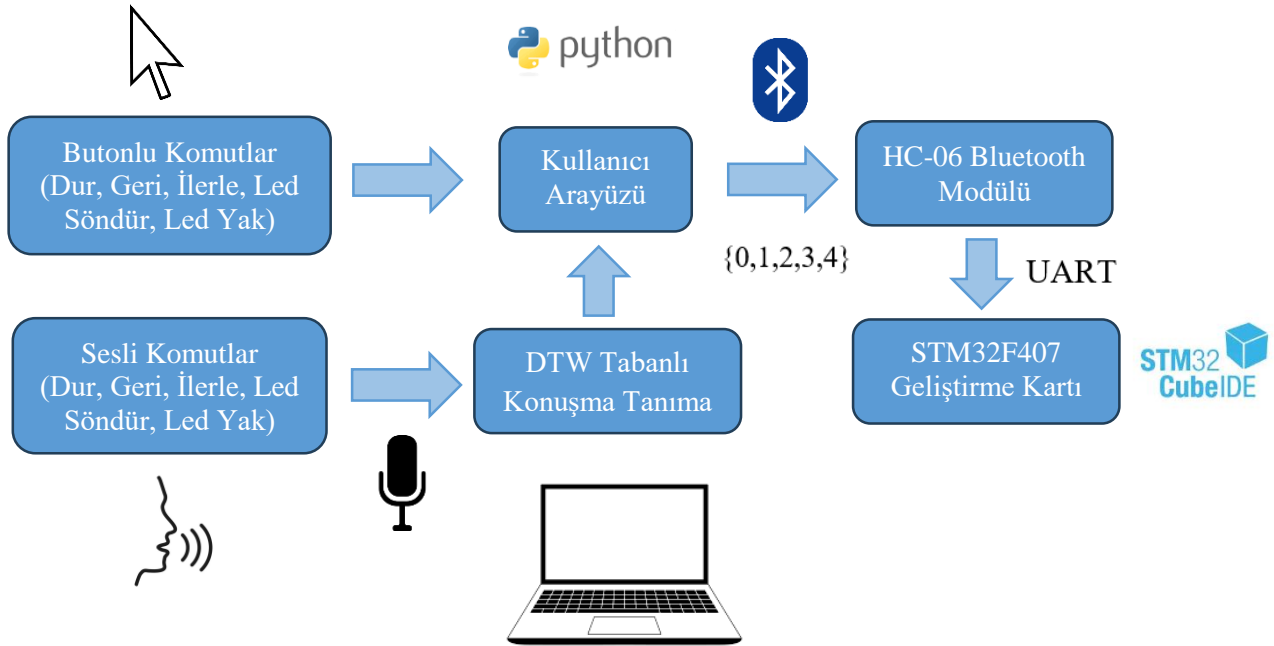


Şekil 10. Tasarlanan Araca ait Fritzing Programında Çizilen Elektronik Devresi

STM32F407 Geliştirme Kartı Tabanlı Kablosuz Robotik Araç Kontrolleri

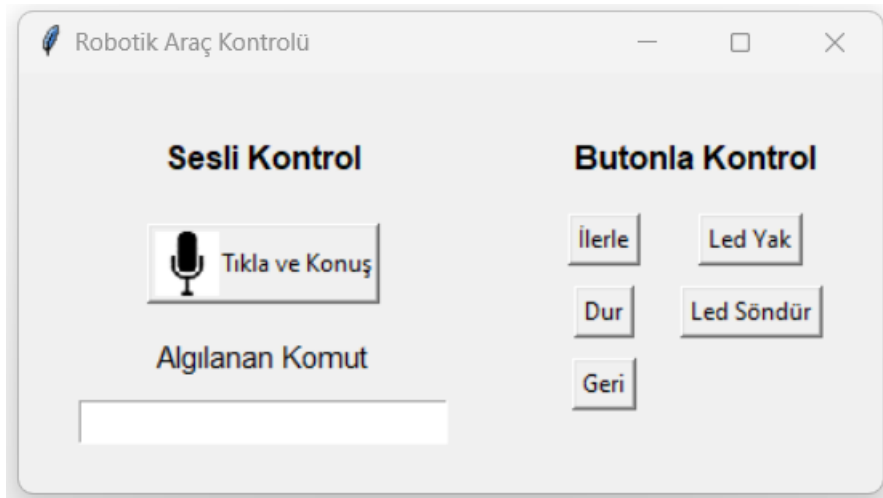
STM32F407 geliştirme kartı kullanarak Bluetooth üzerinden PC ve Akıllı telefon tabanlı olmak üzere iki robotik araç kontrolü çalışması yapılmıştır.

STM32F407 tabanlı ilk çalışma, Bluetooth üzerinden bilgisayar tabanlı olarak butonlu ve sesli komutlarla robotik aracı kontrol etmeyi hedeflemekte olup, oluşturulan sistemin blok diyagramı Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. STM32F407 Tabanlı PC ve Bluetooth Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması

Bu çalışma için hazırlanan Tkinter tabanlı kullanıcı arayüzü Şekil 12’de verilmiştir. Sesli kontrol çalışması için 5 sesli komuttan herhangi biri seslendirildiğinde, PC bilgisayar mikrofonundan alınan ses kaydı, DTW yöntemi kullanılarak eğitim veri setindeki seslerle karşılaştırılmakta ve ilgili komut belirlenmektedir. MFCC ve DTW tabanlı konuşma sesi tanıma işlemi için Python dilinde oluşturulan programın ilgili parçası Şekil 13’te verilmiştir. Burada ‘İleri’ yerine ‘İlerle’ kelimesinin seçilmesinin sebebi, ‘geri’ ve ‘ileri’ kelimelerindeki ‘eri’ benzerliğinden dolayı DTW yöntemi tabanlı ses tanımda bu kelimelerin ayırt edilmesinde yaşanan zorluktur. Bu yüzden, ‘geri’ kelimesinin kullanıldığı veri setinde daha iyi tanıma oranı sağladığından ileri yön için ‘ilerle’ kelimesi kullanılmıştır. Şekil 12’deki kullanıcı arayüzde ‘Sesli Kontrol’ kısmındaki ‘Tıkla ve Konuş’ butonuna tıkladığında, 5 komuttan herhangi biri söylendiğinde, algılanan komut arayüzdeki metin sonuç penceresi kısmına yazdırılmaktadır. Son olarak, STM32F407 geliştirme kartına Bluetooth bağlantı ile sesli komutlara karşılık oluşturulan ‘0, 1, 2, 3, 4’ değerlerinden biri yollanmaktadır ve robotik araç istenilen eylemi gerçekleştirmektedir. Butonlu komutlarla kontrol işleminde ise, kullanıcı arayüzündeki ‘Butonla Kontrol’ kısmındaki herhangi bir buton tıklanarak ilgili eylem gerçekleştirilmektedir. ‘Led Yak’ komutu LED’i yakmak, ‘Led Söndür’ ise LED’i söndürmek için kullanılmaktadır.



Şekil 12. STM32F407 Tabanlı PC ve Bluetooth Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması için Tasarlanan Bilgisayar Kullanıcı Arayüzü

```
def dongu(train, mfcc_test):  
    uzaklık = []  
    x = mfcc_test  
    dmin, jmin = math.inf, -1  
    for k in say:  
        d_ort = 0  
        d_top = 0  
        tekrar = 0  
        for j in train:  
            if labels[j] == kelime[k]:  
                y = mfccs[j]  
                d, path = fastdtw(y,x, dist=euclidean)  
                d_top = d_top + d  
                tekrar = tekrar+1  
        d_ort = d_top/tekrar  
        uzaklık.append(d_ort)  
    dmin, jmin = math.inf, -1  
    for i in say:  
        uzak = uzaklık[i]  
        if uzak < dmin:  
            dmin = uzak  
            jmin = i  
    return kelime[jmin],uzaklık
```

Şekil 13. Python’da MFCC’ye Dayalı DTW Tabanlı Sesli Komut Tanıma İşlemine Ait Kod Parçası

Sunulan konuşma tanıyıcıyı eğitmek amacıyla Tablo 1’de belirtildiği 15 farklı katılımcıdan 5 komut kelimesi için ses kayıtları alınmıştır. Gerçek zamanlı performansını değerlendirmek için ise Şekil 12’deki kullanıcı arayüz kullanarak test işlemi yapılmıştır. Teste aşamasına katılan 10 katılımcının sesleri, eğitim aşamasında kullanılmamıştır. Tablo 1’de görüldüğü üzere, oluşturulan yöntem testte hatasız bir şekilde sınıflandırma yapmıştır. Her kelimenin tanınma başarı oranı Eşitlik (6)’da verilen denklemle hesaplanmıştır (Abed ve Jasim, 2016). Eğer çalışmada ‘ilerle’ yerine ‘ileri’ komutu kullanılsaydı; 10 adet ‘ileri’ test verisinden 2 tanesi ‘geri’, 10 adet ‘geri’ test verisinden 5 tanesi ‘geri’ olarak sistem tarafından algılanmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü bir önceki paragrafta anlatıldığı gibi ‘geri’ ve ‘ileri’ kelimelerindeki ‘eri’ benzerliğinden dolayı DTW yöntemi tabanlı ses tanıma sistemi bu kelimelerin ayırt edilmesinde zorluk yaşamaktadır.

$$\text{Başarı oranı} = \frac{\text{Doğru tanınan kelime sayısı}}{\text{Test edilen kelime sayısı}} \times 100\% \quad (6)$$

Tablo 1. Veri Seti ve DTW Yöntemi Tabanlı Ses Tanıma Başarı Oranı

Ses Komutları	Kodlama	Eğitim		Test		Başarı Oranı
		Erkek	Kadın	Erkek	Kadın	
Dur	0	9	6	6	4	%100
Geri	1	9	6	6	4	%100
İlerle	2	9	6	6	4	%100
Led Söndür	3	9	6	6	4	%100
Led Yak	4	9	6	6	4	%100

STM32F407 kartının aldığı komuta uygun bir biçimde eylem gerçekleştirmesi için STM32CubeIDE kullanarak C dilinde proje dosyası oluşturulmuştur. Bu projede ‘İlerle’ komutuna karşılık gelen program kod parçası Şekil 14’te verilmiştir.

```
/* INFINITE LOOP */
/* USER CODE BEGIN WHILE */
while (1) {
    /* USER CODE END WHILE */
    HAL_UART_Receive(&huart6, (uint8_t*) rx_buffer, 50, 300);

    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_9, GPIO_PIN_RESET); //ENABLE1
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_10, GPIO_PIN_RESET); //ENABLE2
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_11, GPIO_PIN_RESET); // IN1 Motor 1
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_12, GPIO_PIN_RESET); // IN2 Motor 1
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_RESET); // IN3 Motor 2
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_14, GPIO_PIN_RESET); // IN4 Motor 2

    HAL_Delay(500);

    /* USER CODE BEGIN 3 */

    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_9, GPIO_PIN_SET); // ENABLE 1 AKTIF
    HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_10, GPIO_PIN_SET); // ENABLE 2 AKTIF

    // İLERLE HAREKETİ
    if (rx_buffer[0] == '2' ) {

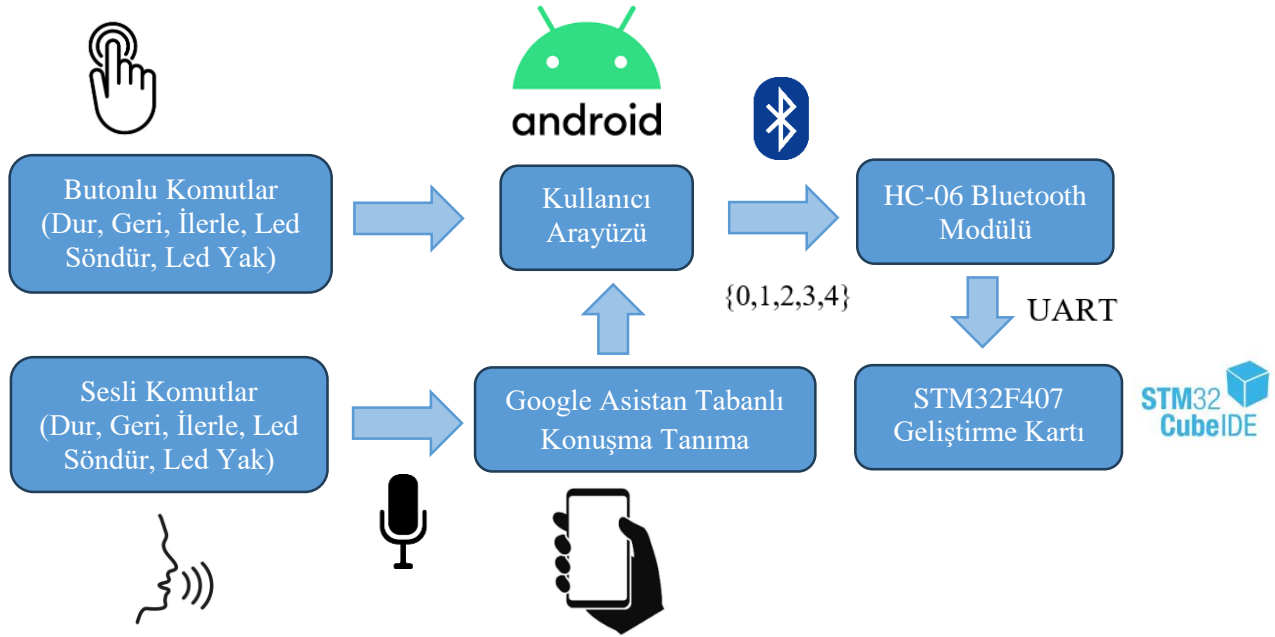
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_11, GPIO_PIN_RESET); // IN1 Motor 1
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_13, GPIO_PIN_SET); // IN3 Motor 2
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_12, GPIO_PIN_SET); // IN2 Motor 1
        HAL_GPIO_WritePin(GPIOE, GPIO_PIN_14, GPIO_PIN_RESET); // IN4 Motor 2

        HAL_Delay(3000);
    }
}
```

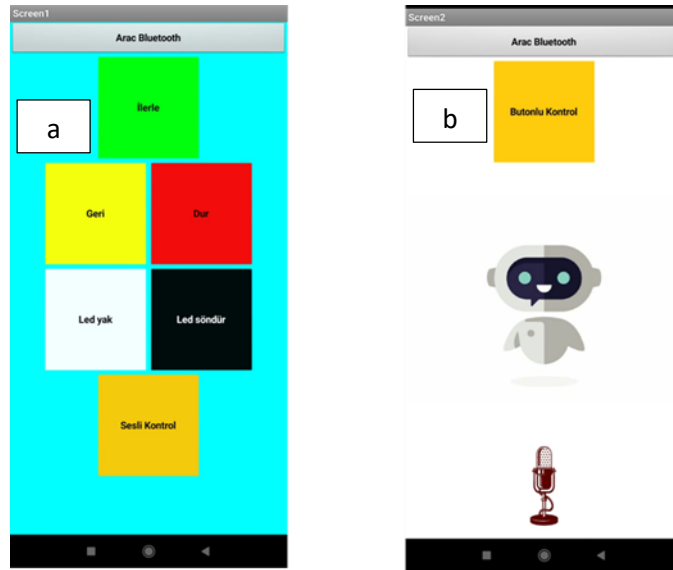
Şekil 14. STM32Cube IDE’de Hazırlanan Programın bir Parçası

STM32F407 tabanlı ikinci çalışma ise akıllı telefon kullanarak butonlu veya sesli komutlarla robotik aracı kontrol etmeyi hedeflemekte olup, oluşturulan sistemin blok diyagramı Şekil 15'te verilmiştir. Bu çalışma için Şekil 16.a'da görüldüğü üzere 6 adet tuştan oluşan bir akıllı telefon mobil uygulama ara yüzü MIT App Inventor platformu üzerinden geliştirilmiştir. İlk 5 buton, robotik araç kontrol komutları olup, 6. buton olan 'Sesli kontrol' butonu ise ikinci bir ekrana yönlendirmektedir (Şekil 16.b). Bu ekranda mikrofon imgesine tıklayarak Google asistan aracılığıyla sesli komutlar metne çevrilip Bluetooth üzerinden '0, 1, 2, 3, 4' değerleri STM32F407 kartına gönderilmektedir. Bu çalışmada STM32 kartı için kullanılan kod, PC tabanlı çalışmada kullanılan kodun aynısıdır.

Bu ikinci çalışmada, Tablo 1'de test aşamasında yer alan 5 katılımcı üzerinden sistemin sesli çalışması test edildi ve oluşturulan sistemin hatasız olarak komutları algıladığı ve ilgili eylemi gerçekleştirdiği görülmüştür.



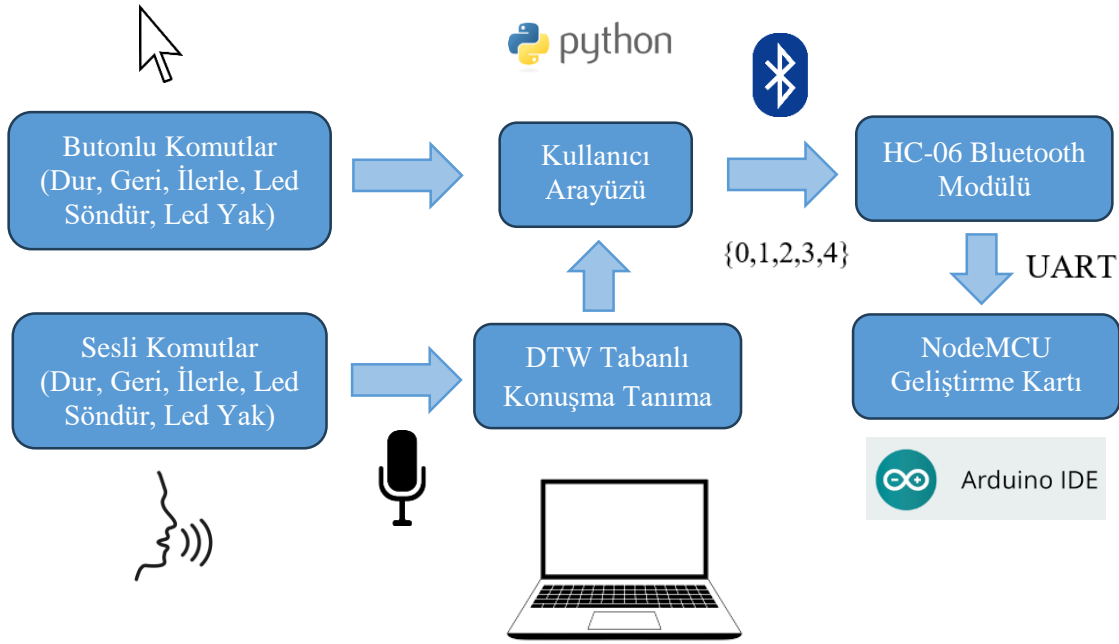
Şekil 15. STM32F407 Tabanlı Akıllı Telefon ve Bluetooth Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması



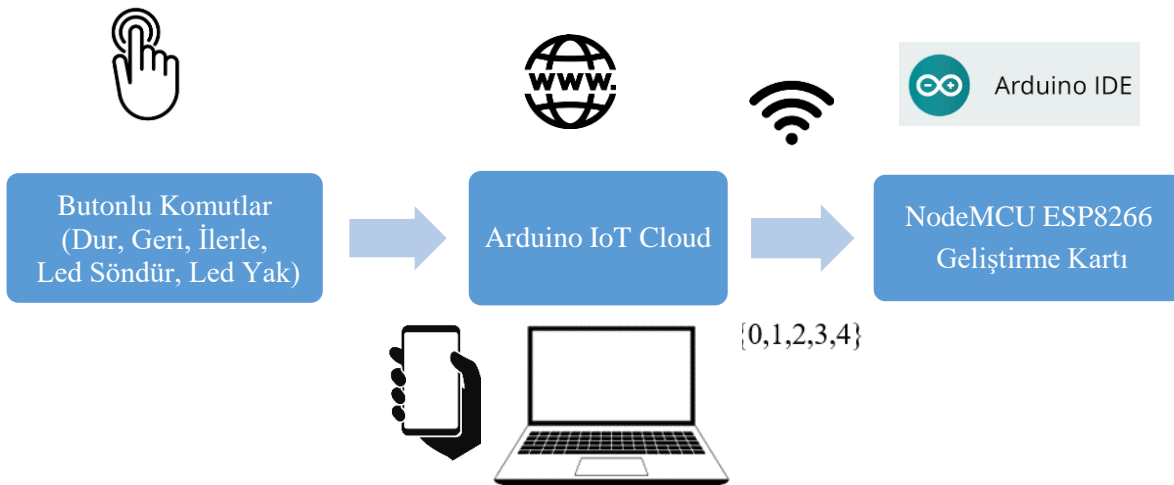
Şekil 16. STM32F407 Tabanlı Akıllı Telefon ve Bluetooth Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması için Telefon Uygulaması Arayüzü a. Butonlu Komutlar için b. Sesli Komutlar için

NodeMCU Geliştirme Kartı Tabanlı Kablosuz Robotik Araç Kontrolleri

NodeMCU kartı kullanarak Bluetooth ve internet üzerinden PC ve Akıllı telefon tabanlı olmak üzere iki robotik araç kontrolü çalışması yapılmıştır. İlk çalışma, Bluetooth üzerinden bilgisayar tabanlı olarak butonlu ve sesli komutlarla aracı kontrol etmeyi hedeflemektedir. STM32F407 için hazırlanan ilk çalışmaya benzer olan sistemin blok diyagramı Şekil 17’de verilmiştir. Kullanıcı arayüzü Şekil 12’deki gibi olup NodeMCU için uygulama programı Arduino IDE platformunda yazılmış ve karta yüklenmiştir. Sadece butonlu komutlar için olan ikinci çalışmada ise, ESP8266 Wi-Fi modülü barındıran NodeMCU kartı kullanarak PC veya Akıllı telefon üzerinden nesnelerin interneti tabanlı robotik araç kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmayla ilgili oluşturulan sistemin blok diyagramı Şekil 18’de verilmiştir. Bu sistemin çalıştırılması için Arduino IoT Cloud platformu üzerinden bir kullanıcı arayüz oluşturulmuştur (Şekil 19). Bu arayüzde internete bağlı olarak aracın hareketlerini uzaktan kontrol etmek için 3 adet buton (İlerle, Dur, Geri), LED kontrol için bir anahtar ve LED durum takibi için bir adet gösterge konulmuştur. NodeMCU için oluşturulan çalışmalar 5 katılımcı tarafından test edildi ve sistemin hatasız olarak çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 17. NodeMCU Tabanlı PC ve Bluetooth Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması



Şekil 18. Butonlu Komutlarla NodeMCU Tabanlı Nesnelerin İnterneti Temelli Robotik Araç Kontrol Çalışması

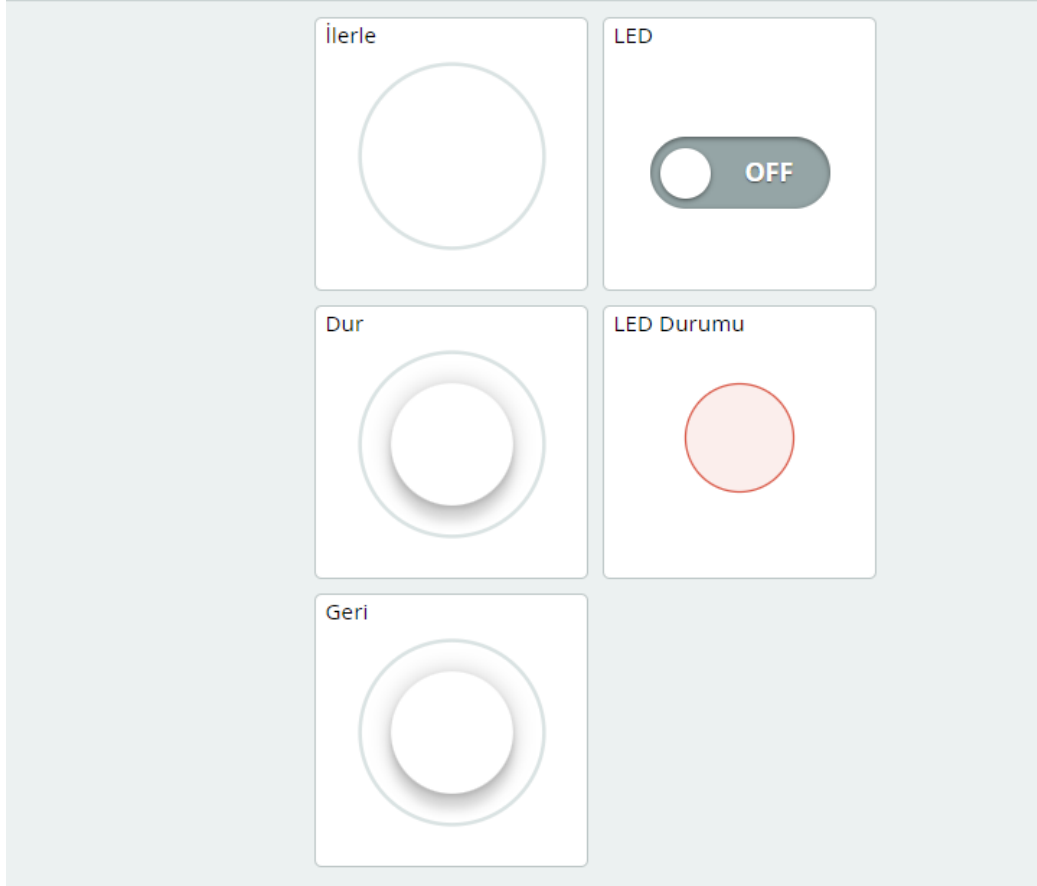
Dashboards

Devices

Integrations

Templates

Robotik Araba Kontrol



Şekil 19. Arduino IoT Cloud Arayüzü

SONUÇLAR

Bu çalışmada, internetli ve internetsiz ortamlarda çalışabilecek şekilde Türkçe sesli komutlarla veya dokunmatik butonlarla kontrol edilebilen 3 tekerlekli robotik bir araç gerçekleştirilmesi için STM32F407 ve NodeMCU geliştirme kartlarının kullanımı incelenmiştir. Öncelikle butonlu ve sesli komutlarla yönlendirilebilecek STM32F407 tabanlı PC ve Bluetooth temelli robotik araç kontrol çalışması yapılmıştır. Sesli komutların algılanabilmesi için MFCC ve DWT yöntemleri kullanılmış, eğitim amaçlı 15 katılımcıdan ses örnekleri alınmıştır. Eğitime katılmamış 10 katılımcı ile sistem test edilmiş ve %100 başarı oranı yakalanmıştır. Sistem kullanımı için Tkinter tabanlı bir kullanıcı arayüz oluşturulmuştur. Daha sonra, butonlu ve sesli komutlarla STM32F407 tabanlı akıllı telefon ve Bluetooth temelli robotik araç kontrol çalışması yapılmıştır. Bu sistemin kullanımı için ise bir mobil kullanıcı arayüzü hazırlanmıştır. Son olarak, NodeMCU tabanlı Bluetooth ve Wi-Fi bağlantılarıyla çalışan yöntemler gerçekleştirilmiştir. Wi-Fi bağlantılı Nesnelerin İnterneti çalışması için Arduino IoT Cloud platformunda bir arayüz oluşturulmuştur. Çalışmada, STM32F407 kartının programlanması için C programlama dili ve STM32CubeIDE platformu; NodeMCU kartının programlanması için ise C++ tabanlı Arduino programlama dili ve Arduino IDE platformu kullanılmıştır. Gerçek zamanlı test çalışmaları, oluşturulan sistemlerin başarıyla çalıştığını göstermiştir.

Bu çalışmayla bağlantılı olarak robotik araçlarla ilgili olarak gelecekte yapılabilecek çalışmalar için şunlar önerilmektedir:

- Nesnelerin interneti ile kontrol işleminde bulut platforma sesli komutla çalışma özelliklerinin eklenmesi
- Uzaktan veya yüksek riskli alanlarda kullanım için çeşitli sensörlerin ve kameranın sisteme eklenmesi

- Sesli komutla kontrol çalışması için DTW yerine HMM veya diğer konuşma tanıma modellerinin kullanımının incelenmesi
- Tekerlekli robotik araçlar yerine adımlama yapan iki ayaklı robotların kontrolünün çalışılması

KAYNAKLAR

- Abd Jalil, A. M., Mohamad, R., Anas, N. M., Kassim, M., & Suliman, S. I. (2021). Implementation of vehicle ventilation system using NodeMCU ESP8266 for remote monitoring. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(1), 327-336.
- Abed, A. A., & Jasim, A. A. (2016). Design and implementation of wireless voice controlled mobile robot. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Science*, 9(2), 135-147.
- Andrew, A. B., Rajiv, S. A., Jusat, N., Zainuddin, A. A., Subramaniam, K., Rahman, N. A., & Sahak, R. (2021, August). Implementation of low-cost voice command robot using arduino uno platform. In *2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)* (pp. 134-139). IEEE.
- Aras, S., Öztürk, M., & Gangal, A. (2014, April). Recognition of real time voiced direction commands. In *2014 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 2245-2248). IEEE.
- Baltacıoğlu, F. (2010). Uzaktan sesle kontrol edilebilen robot tasarımı ve yapımı. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya.
- Bakır, Ç. (2016). Alman dili üzerinde konuşmacı cinsiyetinin otomatik olarak belirlenmesi. *Academic Platform-Journal of Engineering and Science*, 4(2), 52-58.
- Chakraborty, S., De, N., Marak, D., Borah, M., Paul, S., & Majhi, V. (2021, October). Voice controlled robotic car using mobile application. In *2021 6th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)* (pp. 1-5). IEEE.
- Chandelker, D., Kogahe, A., Suryawanshi, H., Chopde, N., Patil, N., Malviya, S., Sahu, V. & Chadokar, S. (2021). Arduino based voice control car. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 8(03), 1424-1429.
- Chikhale, M. V., Gharat, M. R., Gogate, M. S., & Amireddy, M. R. (2017). Voice controlled robotic system using Arduino microcontroller. *International Journal of New Technology and Research*, 3(4), 92-94.
- Çelebi, M. (2012). Ses komut tanıma ile gezgin araç kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Çubukçu, A., Kuncan, M., Kaplan, K., & Ertunc, H. M. (2015, May). Development of a voice-controlled home automation using Zigbee module. In *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1801-1804). IEEE.
- Diğken, G., & Ibrikci, T. (2015, May). Recognition of non-speech sounds using Mel-frequency cepstrum coefficients and dynamic time warping method. In *2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 144-147). IEEE.
- Doğan, S. (1999). PC ortamında sesli komutları tanıma. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul.
- Dutta, P. P., Kumar, A., Singh, A., Saha, K., Hazarika, B., Narzary, A., & Sharma, T. (2020, June). Design and development of voice controllable wheelchair. In *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)* (pp. 1004-1008). IEEE.
- Edizkan, R., Tiryaki, B., Büyükcan, T., & Uzun, İ. (2007, Ocak). Ses komut tanıma ile gezgin araç kontrolü. In *Akademik Bilişim 2007* (pp. 1-4).
- Gupta, M., Kumar, R., Chaudhary, R. K., & Kumari, J. (2021, December). IoT based voice controlled autonomous robotic vehicle through google assistant. In *2021 3rd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICAC3N)* (pp. 713-717). IEEE.
- Gündoğdu, K., & Çalhan, A. (2013). Ses denetimli engelli insan aracı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 110-119.

- Gündoğdu, K., & Yücedağ, İ. (2013). Ses veya arayüz yardımı ile kontrol edilebilen mobil robot kol tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 24-31.
- Harika, T., Chaitanya, M. L., Avinash, V. J., Arun, V., & Shamuella, S. (2018). Voice controlled robot using raspberry pi. *International Journal of Innovative Technologies*, 6(01), 0257-0261.
- Ioana, G., & Văduva, J. A. (2022, October). Voice controlled robot dog. In *2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* (pp. 195-200). IEEE.
- İskender, A., Üçgün, H., Yüzgeç, U., & Kesler, M. (2017, October). Voice command controlled mobile vehicle application. In *2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)* (pp. 929-933). IEEE.
- Jiang, J., Ying, S., Fu, W., & Jiang, X. (2023). Structure design and system implementation of a supermarket shopping robot based on deep learning. *International Journal of Data Science*, 8(1), 1-15.
- Kannan, K., & Selvakumar, J. (2015). Arduino based voice controlled robot. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2(01), 49-55.
- Karthik, P. C., Singh, R. P., & Gupta, M. (2020). Voice controlled robot using nodemcu. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(04), 1921-1925
- Khan, R. L., Priyanshu, D., & Alsulaiman, F. S. (2021, December). Implementation of human voice controlled robotic car. In *2021 10th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)* (pp. 640-646). IEEE.
- Khawate, S., Prajapati, K., Anand, Y., & Chandodwala, K. (2022). Voice controlled robotic car using arduino. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET)*, 9(3), 119-129.
- Kumar, T. S., & Rao, V. R. (2020). Voice controlled robot using wi-fi module. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7, 423-425.
- Kuriakose, S., Harshitha, M. M., Keerthana, D. G., Adarsh, S., & Harshitha, K. (2023, March). Wireless voice controlled robot. In *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)* (Vol. 1, pp. 189-194). IEEE.
- Kurniawan, A., & Kurniawan, A. (2021). Arduino IoT Cloud. *Beginning Arduino Nano 33 IoT: Step-By-Step Internet of Things Projects*, 131-155.
- Manwani, A., Dhirani, J., Baloch, A., & Wasan, R. H. (2022). Design of voice-controlled robot vehicle. *Journal of Applied Engineering & Technology (JAET)*, 6(1), 40-47.
- Moore, A. D. (2018). *Python GUI Programming with Tkinter: Develop responsive and powerful GUI applications with Tkinter*. Packt Publishing Ltd.
- Mnassri, A., Nasri, S., Boussif, M., & Cherif, A. (2022, May). Robust real-time automatic voice command based on raspberry pi for assistance disabled people. In *2022 IEEE 9th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT)* (pp. 474-478). IEEE.
- Muda, L., Begam, M., & Elamvazuthi, I. (2010). Voice recognition algorithms using mel frequency cepstral coefficient (MFCC) and dynamic time warping (DTW) techniques. *arXiv preprint arXiv:1003.4083*.
- Nguyen, Q. (2019). *Hands-on application development with PyCharm: Accelerate your Python applications using practical coding techniques in PyCharm*. Packt Publishing Ltd.
- Pal, D., Kaur, N., Motwani, R., Mane, A. D., & Pal, P. (2023, March). Voice-Controlled robot using arduino and bluetooth. In *2023 3rd International Conference on Smart Data Intelligence (ICSMDI)* (pp. 546-549). IEEE.
- Pinjarkar, S., Khadpe, S., Tavte, A., & Karpe, R. (2017). Voice controlled robot through android application. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(04), 3266-3268.
- PyCharm. JetBrains. 2019. <https://www.jetbrains.com/pycharm/> Accessed 19.08.23.
- Python. Python Software Foundation. <https://www.python.org/> Accessed 19.08.23.
- Rasal, S. P. (2014). Voice controlled robotic vehicle. *International Journal of New Trends in Electronics and Communication*, 2(1), 28-30.

- Rashid, H., Ahmed, I. U., Osman, S. B., Newaz, Q., Rasheduzzaman, M., & Reza, S. T. (2017, January). Design and implementation of a voice controlled robot with human interaction ability. In *International Conference on computer, communication, chemical, materials and electronic engineering* (Vol. 65, pp. 148-151).
- Sachdev, S., Macwan, J., Patel, C., & Doshi, N. (2019). Voice-controlled autonomous vehicle using IoT. *Procedia Computer Science*, 160, 712-717.
- Santhakumar, M., Saran, S., Sathishkumar, S., Gunaseelan, M., & Elango, K. (2021). Voice controlled car using android, arduino and bluetooth. *J Elect Eng Technol (IJEET)*, 12(3), 244-251.
- Saravanan, M., Selvababu, B., Jayan, A., Anand, A., & Raj, A. (2020, December). Arduino based voice controlled robot vehicle. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (993(1), p. 012125). IOP Publishing.
- Selvi, C. T., Anishviswa, N., Karthi, G. A., Darshan, K., & Balaji, M. G. (2021, November). Automated voice controlled car using arduino with camera. In *2021 Fifth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)* (pp. 708-711). IEEE.
- Shah, S. M. A. (2021). Multi-way controlled robot vehicle using arduino and rf module. *Journal of Applied Engineering & Technology (JAET)*, 5(1), 1-8.
- Siddesh, G. K., Patel, R. K., Maitra, S., Bhattacharya, S., Moosa, S., & Pavan, P. (2023, March). Robotic car using nodemcu esp8266 wi-fi module. In *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)* (Vol. 1, pp. 1439-1443). IEEE.
- Sissodia, R., Rauthan, M. S., & Barthwal, V. (2023, February). Arduino based bluetooth voice-controlled robot car and obstacle detector. In *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)* (pp. 1-5). IEEE.
- Sowmiya Bharani, B. (2021). Arduino based voice controlled robotic arm and wheels. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, 12(12), 2452-2457.
- Srinath, K. R. (2017). Python—the fastest growing programming language. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(12), 354-357.
- Srivastava, S., & Singh, R. (2020). Voice controlled robot car using Arduino. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 7(05), 4033-4037.
- STM32F407VG. STMicroelectronics. <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html> Accessed 20.08.23.
- Timsina, A., Sharma, D. C., Sharma, N., Bhutia, A., & Pardhan, S. (2020). Voice command robotics car. *Int Res J Modern Eng Technol Sci*, 2(06), 1393-1397.
- Tkinter. Python interface to Tcl/Tk - Python 3.7.2 documentation. Python Software Foundation. 2019. <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html> Accessed 19.08.23.
- Top, A., & Gökbulut, M. (2022). Android Application Design with MIT App Inventor for Bluetooth Based Mobile Robot Control. *Wireless Personal Communications*, 126(2), 1403-1429.
- Ullah, S., Mumtaz, Z., Liu, S., Abubaqr, M., Mahboob, A., & Madni, H. A. (2019). Single-equipment with multiple-application for an automated robot-car control system. *Sensors*, 19(3), 662, 1-18.
- Ünsalan, C., Gürhan, H. D., Yücel, M. E., Ünsalan, C., Gürhan, H. D., & Yücel, M. E. (2022). Advanced Topics. *Embedded System Design with ARM Cortex-M Microcontrollers: Applications with C, C++ and MicroPython*, 555-563.
- Vatansever, A., & Kuscü, H. (2016). Design of voice controlled vehicle. In *International Conference on Advances Automotive Technologies 2016* (pp. 32-38). Istanbul, Turkey: Yildiz Technical University.
- Verma, A., Kumar, D., Maurya, H., Kumar, A., & Dwivedi, M. P. (2020). Voice control robot using arduino. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 2(04), 855-858.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.09.2023
Kabul Tarihi : 13.10.2023

Received Date : 06.09.2023
Accepted Date : 13.10.2023

BLOOD PRESSURE AND HEART RATE ESTIMATION VIA TQWT BASED DECOMPOSITION OF PPG SIGNALS

PPG SİNYALLERİNİN TQWT TABANLI AYRIŞTIRILMASI YOLUYLA KAN BASINCI VE KALP ATIŞ HIZI TAHMİNİ

*Fatma Sevde KÖKLÜKAYA*¹ (ORCID: 0000-0002-9348-0925)
Mahmut ÖZTÜRK^{1*} (ORCID: 0000-0003-2600-7051)

¹ Istanbul University - Cerrahpaşa, Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mahmut ÖZTÜRK, mahmutoz@iuc.edu.tr

ABSTRACT

Photoplethysmography (PPG) signals are getting more popular and promising for medical applications because of the non-invasive, fast, and simple recording techniques. Using PPG signals for monitoring the blood pressure (BP) and heart rate (HR) levels instead of traditional invasive and cuff-based measurement techniques is possible and continuous tracing of BP and HR levels can be accomplished with high measurement accuracies. These developments are very important and helpful, especially for people suffering from high tension and cardiac problems. In this study, we propose to use Tunable Q-factor Wavelet Transform (TQWT) for decomposing the PPG signals into sub-signals and extracting some statistical features from each of the sub-signals and main signal. Artificial Neural Networks (ANN), Random Forests (RF), and Support Vector Machines (SVM) algorithms are employed to estimate diastolic blood pressure (DBP), systolic blood pressure (SBP), and heart rate (HR) values. PPG signals, DBP, SBP, and HR values which were measured with traditional methods were obtained from the open dataset of Guilin People's Hospital of China. This dataset includes information of 219 individuals. Each machine learning method was applied to the features separately, and the results of the regression analysis were interpreted by using the error rates and correlations between the actual and estimated values. Results show that the RF algorithm is more successful than ANN and SVM for the estimation of DBP, SBP, and HR levels.

Keywords: Photoplethysmography, TQWT, machine learning, blood pressure, heart rate

ÖZET

Fotoplethysmografi (PPG) sinyalleri, invaziv olmayan, hızlı ve basit kayıt teknikleri nedeniyle tıbbi uygulamalar için daha popüler ve umut verici hale geliyor. Kan basıncını (KB) ve kalp atış hızı (KAH) seviyelerini izlemek için geleneksel invaziv ve manşet tabanlı ölçüm teknikleri yerine PPG sinyallerinin kullanılması mümkündür ve KB ve KAH seviyelerinin sürekli takibi, yüksek ölçüm doğruluklarıyla gerçekleştirilebilir. Bu gelişmeler özellikle yüksek tansiyon ve kalp sorunu yaşayan kişiler için çok önemli ve faydalıdır. Bu çalışmada, PPG sinyallerini alt sinyallere ayırtmak ve her bir alt sinyalden ve ana sinyalden bazı istatistiksel özellikler çıkarmak için Ayarlanabilir Q-faktörü Dalgacık Dönüşümü'nü (TQWT) kullanmayı öneriyoruz. Diastolik kan basıncı (DKB), sistolik kan basıncı (SKB) ve kalp atış hızı (KAH) değerlerinin tahmin edilmesinde Yapay Sinir Ağları (YSA), Rastgele Ormanlar (RF) ve Destek Vektör Makineleri (SVM) algoritmaları kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerle ölçülen PPG sinyalleri, DKB, SKB ve KAH değerleri Çin Guilin Halk Hastanesi'nin açık veri setinden elde edildi. Bu veri seti 219 kişinin bilgilerini içermektedir. Her bir makine öğrenmesi yöntemi, özelliklere ayrı ayrı uygulanmış ve regresyon analizi sonuçları, hata oranları ve gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki korelasyonlar kullanılarak yorumlanmıştır. Sonuçlar RF algoritmasının DKB, SKB ve KAH seviyelerinin tahmininde YSA ve SVM'den daha başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Fotoplethysmografi, TQWT, makine öğrenimi, kan basıncı, kalp atış hızı

ToCite: KÖKLÜKAYA, F. S., & ÖZTÜRK, M., (2023). BLOOD PRESSURE AND HEART RATE ESTIMATION VIA TQWT BASED DECOMPOSITION OF PPG SIGNALS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(4), 1050-1060.

INTRODUCTION

Today, with the advancements in biomedical device technologies, the measurements needed for the diagnosis and monitoring of patient's health problems can be performed non-invasively and conveniently, without causing patient discomfort and requiring surgical procedures. The optical measurement method called photoplethysmography used for measurements such as heart rate and blood pressure (BP) is among the most commonly used methods today (Kraitl and Hartmut, 2005). Hertzman introduced the PPG technique for the first time in 1937 (Hertzman, 1938).

Photoplethysmography (PPG) signals are frequently used especially in the research and investigation of vascular diseases thanks to the ease of use and cost-effectiveness of the method. In scientific studies conducted with the PPG signals, some important physiological parameters such as BP, respiratory data, and heart rate (HR) have been extracted from these signals and used as an alternative to biological signals (Nafisi and Shahabi, 2018; Bagha and Shaw, 2011; Allen, 2007). In the first years of the PPG method had been introduced, it was used to determine a limited number of physiological characteristics such as HR and heart rate variations (HRV). However, thanks to the studies that continue today, it has been determined that PPG signals contain many physiological parameters of the individuals (Übeyli et al., 2010). There is a plethora of studies in the literature using many characteristics extracted from the PPG signals. Some of the characteristics investigated are the number of PPG pulses, signal amplification time, pulse transit time (PTT), pulse arrival time (PAT), amplitude, normalized PPG pulse shape, pulse width, and pulse height (Allen and Murray, 2003).

The PPG signals have been the subject of a vast number of studies in the last decades. The most common and fundamental one among these studies is the detection of pulse rate using the PPG signals. Shin H. S. et al. have developed the adaptive threshold method and detected the peak points of the PPG signals (Shin et al., 2009). The PPG signals have two peak points: systolic and diastolic (Mc Duff et al., 2014). The systolic peak shows the moment the heart pumps blood to the body, and the diastolic peak shows the moment of closure of the aortic valves (Yousef et al., 2012). In their study, Shin H. S. et al. (Shin et al., 2009) determined the adaptive threshold value and the systolic peaks of the PPG. In the study presented by Johnston, methods estimating arterial saturation, HR, HRV, and respiratory rate based on the PPG signals have been investigated (Johnston, 2006).

It is possible to measure the BP using invasive or non-invasive methods. Invasive measurement is definitely more accurate, but it is applicable only in clinics or hospitals. The most common non-invasive BP measurement technique is the use of the traditional cuff sphygmomanometer. Only experienced people can use this device and it is not comfortable and useful in daily routines of patients. Using the PPG signals to monitor BP has become more popular and easier in the last decades. It is a non-invasive and cuffless measurement technique. This makes it possible to use it often in daily life and monitor the BP level. A smartwatch or even a simple wrist can be used to sense PPG signals and estimate the BP levels using these signals.

In the last decade, many researches have been done to estimate BP using PPG signals. Kurylyak et al. obtained time-domain features from PPG waveforms and estimated systolic blood pressure (SBP) and diastolic blood pressure (DBP) using an Artificial Neural Network (ANN) (Kurylyak et al., 2013). Teng and Zhang presented a linear regression model to estimate BP using the PPG signals (Teng and Zhang, 2003). Their results achieved the standards of the American National Standards of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI) (ANSI, 2017). Xing and Sun proposed to use of frequency domain features of PPG signals and a feedforward neural network for estimating the BP levels (Xing and Sun, 2016). They obtained power spectrums of PPG signals first and obtained features from amplitudes and shapes of the power spectrums. Gao et al. proposed a new BP estimation approach using discrete wavelet transform (DWT) and support vector machine (SVM) (Gao et al., 2016).

Some researchers preferred to use time domain and frequency domain features together. Using time-frequency analysis methods at feature extraction stage is the most convenient approach in these researches. Rastegar et al. used continuous wavelet transform (CWT) to obtain scalograms of PPG and ECG signals (Rastegar et al., 2019). Then, they fed a convolutional neural network (CNN) with the images of scalograms to estimate the BP. In the method presented by Schlesinger et al., spectrograms of the PPG signals were obtained, and spectro-temporal features were extracted using them (Schlesinger et al., 2020). Encouraging results were reported for TF based approaches.

METHODOLOGY

In this study, we propose a decomposition based approach to estimate the SBP, the DBP, and HRV from PPG signals using machine learning methods. The PPG signals were decomposed into their sub-bands using the Tunable Q-Factor Wavelet Transform (TQWT) (Selesnick, 2011) method, and the features were extracted from each sub-band separately. The TQWT was preferred because of its high representation capability for random signals like PPG. Width and fluctuations of the mother wavelet can be changed easily and effectively with the TQWT method. Thus, the mother wavelet can be arranged depending on the time-varying frequency of random signals. For estimating the BP and HR values, artificial neural networks (ANN), random forests (RF), and support vector machines (SVM) were employed as the machine learning methods. These methods were employed in regression analysis mode using the Weka software.

We obtained the PPG signals from the open dataset shared by Guilin People's Hospital, China (Liang et al., 2018). The dataset includes PPG records of 219 individuals with SBP, DBP, and HRV levels. The individuals aged between 21 and 86. 104 of them are males and 115 are females. Duration of each PPG segment is 2,1 seconds and the dataset contains 3 different PPG segments for each individual. Sampling frequency is 1 kHz.

PPG Acquisition, Blood Pressure and Heart Rate Levels

PPG signals can be measured in areas where there are many capillary vessels such as fingertips and earlobes as well as the wrists. During this measurement, an LED emitting light at a certain wavelength as a transmitter, and a photodiode sensitive to such wavelength, which also functions as a receiver, are used in the sensor part. PPG can also be measured on protrusions such as fingertips, toes, forehead, and earlobes (Allen, 2007; Allen and Murray, 2003). As PPG signals are measured on areas outside the trunk, especially on the fingers or ears, they are easier to acquire and process, painless, and more practical compared with conventional medical methods.

Table 1. Classification of BP Levels for Adults (Büyüköztürk, 1999)

Tension Classes	SBP		DBP
Optimal	< 120	and	< 80
Normal	< 130	and	< 85
High-Normal	130-139	or	85-89
Hypertension			
Stage 1	140-159	or	90-99
Stage 2	160-179	or	100-109
Stage 3	≥180	or	≥110
Isolated Systolic Hypertension	140-160	and	< 90
Isolated Systolic Hypertension (at the border)	≥160	and	< 90

Hypertension refers to an increase in arterial blood pressure (ABP) above normal values. Today, an SBP ≥ 140 mmHg and a DBP ≥ 90 mmHg or the individual needing to use antihypertensive medication is defined as hypertension (Büyüköztürk, 1999). In adults, BP levels are classified qualitatively. However, in practice, it is important for doctors to take BP values into consideration for convenience of diagnosis and treatment. BPs of adults at the age of 18 or above are divided into four groups, which are optimal, normal, high-normal, and hypertension. As can be seen in Table 1, optimal BP values are lower than 120/80 mmHg. Normal BP is indicated to be lower than 130/85 mmHg. If BP values are 130-139/85-89 mmHg, it is classified as high-normal tension. The values higher than 140/90 are considered as hypertension (Büyüköztürk, 1999).

The biological data called the heart rate or the pulse contains important information about the physiological state of the human body. For example, resting pulse value is a primary indicator in the detection of heart diseases (Liang et al., 2018). In the last decade, heart rate and pulse measurement with PPG have become popular as an alternative to recording heart beat signals with the conventional electrocardiogram (ECG), which has a history of approximately 100 years.

Tunable Q-Factor Wavelet Transform (TQWT)

Analysis of random signals such as PPG is challenging because of their oscillatory and unpredictable nature. As the TQWT is adjusted according to the oscillations, it is a successful method in the analysis of such signals. The TQWT, developed by Selesnick (Selesnick, 2011), is a signal analysis technique that has the capability of easily determining the Q-factor. Thereby, the technique allows to adjust the wavelet transformation according to the signal's oscillation.

Q-factor is the ratio of the central frequency of an oscillating signal to its bandwidth. In this method, as the frequency of the analyzed signal increases, the Q-factor is adaptively increased. An increase in the Q-factor practically means an increase in the number of oscillations of the wavelet. Depending on the variations in the frequency of the signal, the number of oscillations of the mother wavelet is increased or decreased. Thus, a quite successful wavelet transformation is achieved for the analysis of especially non-stationary signals. Thanks to these characteristics, TQWT has become one of the most successful models employed for wavelet transformation. As the biomedical signals also have the non-stationary and oscillatory nature, their transformation using the TQWT method for both the time-frequency analysis and decomposition of the signal into sub-bands yields successful results. The TQWT method is promising for the studies conducted with biomedical signals.

The decomposition process using TQWT can be controlled by changing three tunable parameters. These are Q-factor (Q), redundancy (r), and the number of decomposition levels (J). Each decomposition is performed using low-pass and high-pass filters in this method. If the sampling frequency of the main signal $s[n]$ is f_s , low-pass and high-pass sub-band signals are expressed with the sampling frequencies αf_s and βf_s respectively. Frequency responses of the low-pass, $H_0^J(\omega)$, and the high-pass, $H_1^J(\omega)$, filters are shown as (Selesnick, 2011):

$$H_0^J(\omega) = \begin{cases} \prod_{m=0}^{J-1} H_0(\omega/\alpha^m), & |\omega| \leq \alpha^J \pi \\ 0, & \alpha^J \pi < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

$$H_1^J(\omega) = \begin{cases} H_1(\omega/\alpha^{J-1}) \prod_{m=0}^{J-2} H_0(\omega/\alpha^m), & (1-\beta)\alpha^{J-1}\pi \leq |\omega| \leq \alpha^{J-1}\pi \\ 0, & \text{for other } \omega \in [-\pi, \pi], \end{cases} \quad (2)$$

where,

$$H_0(\omega) = \theta\left(\frac{\omega+(\beta-1)\pi}{\alpha+\beta-1}\right) \quad (3)$$

$$H_1(\omega) = \theta\left(\frac{\alpha\pi-\omega}{\alpha+\beta-1}\right) \quad (4)$$

$\theta(\omega)$ can be expressed as:

$$\theta(\omega) = 0.5(1 + \cos\omega)\sqrt{2 - \cos\omega}, \quad |\omega| \leq \pi \quad (5)$$

and it is the frequency response of the Daubechies filter. The parameters α and β that changes the scaling of signal spectrum can be arranged by r and Q as below (Selesnick, 2011):

$$r = \frac{\beta}{1-\alpha}, \quad Q = \frac{2-\beta}{\beta}. \quad (6)$$

Feature Extraction and Machine Learning

The choice of the features is very important for the success of regression analysis. Features must be selective as much as possible. In this study, we preferred to use most common time-domain features and the entropy features as a first step. More features can be tried and other domains should be used for feature extraction for obtaining better estimation results. We calculated and saved the absolute mean value, standard deviation, skewness, kurtosis and average power of each sub-signal and the main signal. Also, we calculated and saved the ratio of the absolute mean values of each adjacent sub-signals. Then, we calculated entropy features and saved them with other features. The calculated entropy features are shannon entropy, log-energy entropy, and normalized entropy (Acharya et al., 2018).

The chosen features are calculated as below (Ghayab et al., 2019; Acharya et al., 2018):

$$\text{Absolute Mean:} \quad X_{AbsMean} = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right| \quad (7)$$

$$\text{Standard Deviation:} \quad X_{Std} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - X_{mean})^2 / (N-1)} \quad (8)$$

$$\text{Skewness:} \quad X_{Ske} = \sum_{i=1}^N (x_i - X_{mean}) \frac{3}{(N-1)X_{Std}^3} \quad (9)$$

$$\text{Kurtosis:} \quad X_{ku} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - X_{mean})^4}{(N-1)X_{std}^4} \quad (10)$$

$$\text{Average Power:} \quad X_{power} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (11)$$

$$\text{Shannon Entropy:} \quad E_{Shan} = -\sum_{n=1}^x P(S_n) \log_2(P(S_n)) \quad (12)$$

$$\text{Log-Energy Entropy:} \quad E_{Log-En} = \sum_{n=1}^x \log(S_n^2) \quad (13)$$

$$\text{Normalized Entropy:} \quad E_{Norm} = \sum_n |S_n|^k, \quad \text{with } 1 \leq k \quad (14)$$

In this study, machine learning methods were performed using the Weka open source software. This software contains regression, classification and clustering algorithms in addition to preprocessing methods (Engel et al., 2014). Regression analysis was applied to the matrices of the features obtained from PPG sub-band signals by using ANN, RF, and SVM algorithms in the Weka software. At the results of the analysis, SBP, DBP and HR levels were estimated with each of the machine learning methods separately. The machine learning methods used for regression analysis are summarized as follows.

Artificial Neural Networks (ANN)

ANNs are formed as a linked group of neurons. Neurons are grouped as input, output and hidden layers. All neurons are connected with the neurons of neighbor layers. Connections are done with the weighted links. By changing the values of the weights between neurons, output classes or values can be predicted for different inputs. The most common ANN architecture is the multilayer feed forward network. The main advantages of ANNs are the high classification capacity for patterns, robustness against the noisy input and fast computation ability because of the parallel network design (Han et al., 2011). In this work, we preferred to use multilayer feed forward network with backpropagation. We employed two hidden layers beside input and output layers. Input layer includes 143 neurons because of the number of features and the output layer includes 3 neurons because of the number of results.

Random Forests (RF)

RF is an ensemble of the decision tree classifiers. A basic decision tree selects the features randomly and forms random subsets at each node. Thus, it specifies the division. Every decision tree in the RF structure chooses a class. The mostly chosen one becomes the output RF algorithm (Han et al., 2011). In this work, we preferred to use classical RF algorithm.

Support Vector Machines (SVM)

SVM forms support vectors and margins to separate features using hyper-planes. Data can be distinguished depending on the position of it and the boundaries of the hyper-planes. The main advantage of SVM is the high accuracy obtaining capability in non-linear prediction cases. Also, they are very robust against the overfitting problem (Han et al., 2011). In this work, we used classical linear SVM algorithm.

EXPERIMENTS AND RESULTS

The TQWT parameters used in the experiments were as follows: Q=3, r=4, J=15. This means, each PPG signals were decomposed into 15 sub-bands. With the addition of the main signal, we have 16 sub-signals instead of main signal for feature extraction. A total of 143 features were calculated for each main PPG signal.

Approximately 2/3 of the data obtained from the dataset were used for training, and 1/3 for testing. The parameters of Correlation Coefficient (CC), Mean Absolute Error (MAE), and Root Mean Square Error (RMSE) were used for performance analysis. Mathematical expressions of these parameters can be seen below:

$$CC = \frac{N \sum xy - \sum x \sum y}{\left[(N \sum x^2 - (\sum x)^2) (N \sum y^2 - (\sum y)^2) \right]^{1/2}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x - y| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x - y|^2} \tag{14}$$

In the equations (12), (13), and (14), x and y show the estimated and reference values respectively. The correlation coefficients and error rates of the DBP, SBP and HR values estimated by analyzing the features obtained by the TQWT method using the algorithms of ANN, RF, and SVM are provided in Table 2, Table 3, and Table 4, respectively. The correlation coefficient in the estimations made using the RF algorithm is higher than the correlations coefficients in the estimations made using the ANN and SVM algorithms. Whereas the error rates in the estimations made using the RF and SVM algorithms are close to each other. However, the error rates in the estimations made using the ANN algorithm appear to be higher than the other algorithms.

The estimation performances of machine learning methods are shown in Tables 2, 3, and 4. Actual and predicted values of DBP, SBP and HR are shown in the figures below. DBP estimations performed using ANN, RF and SVM methods are shown in Figures 1, 2, and 3.

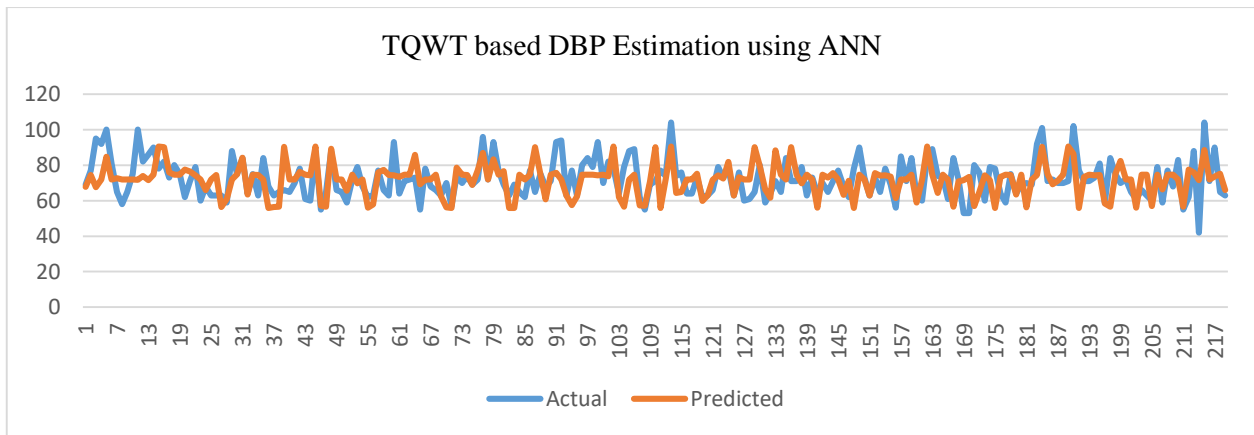


Figure 1. TQWT based DBP Estimation using ANN

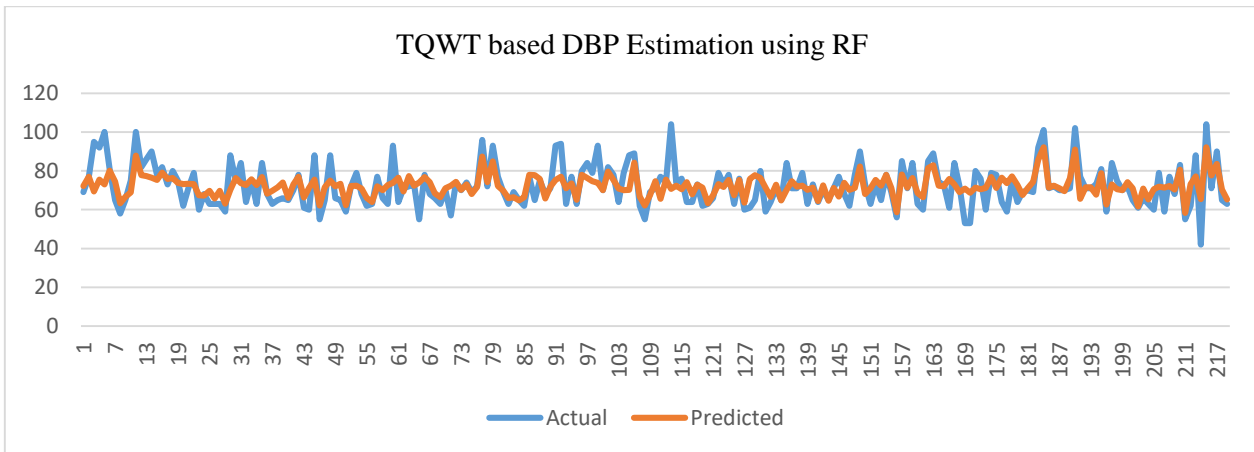


Figure 2. TQWT based DBP Estimation using RF

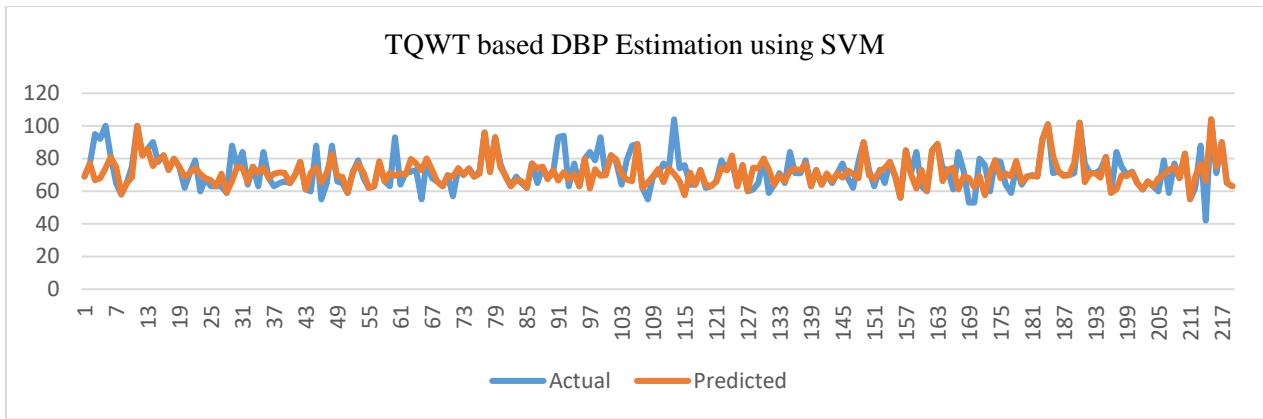


Figure 3. TQWT based DBP Estimation using SVM

Table 2. Normalized Correlations and Error Rates for TQWT based DBP Estimation

Method	CC	MAE (mmHg)	RMSE (mmHg)
ANN	0.4122	8.0119	9.1953
RF	0.7219	4.4732	6.9235
SVM	0.6714	3.8891	6.1135

SBP estimations performed using ANN, RF and SVM algorithms can be seen in Figures 4, 5, and 6.

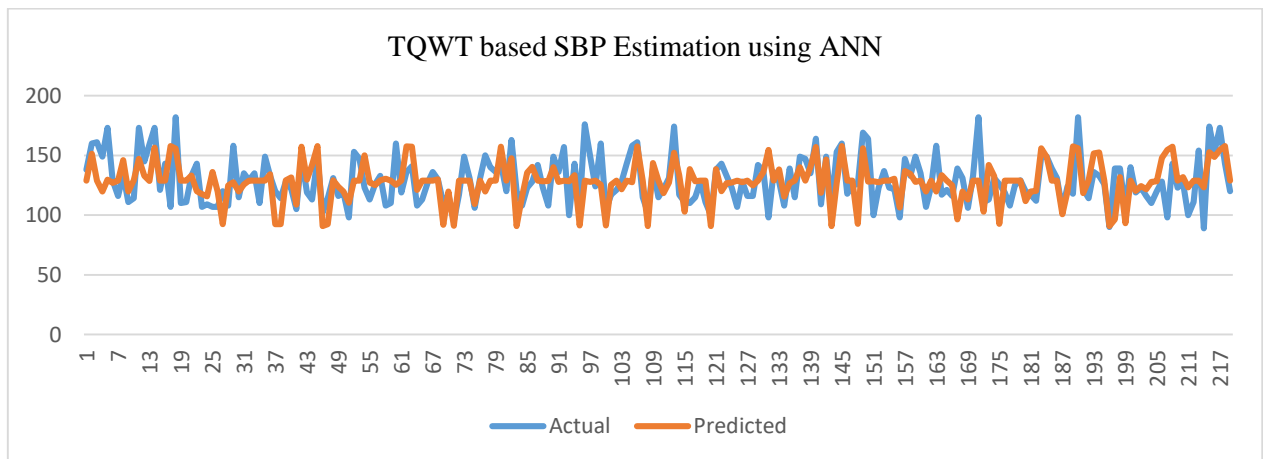


Figure 4. TQWT based SBP Estimation using ANN

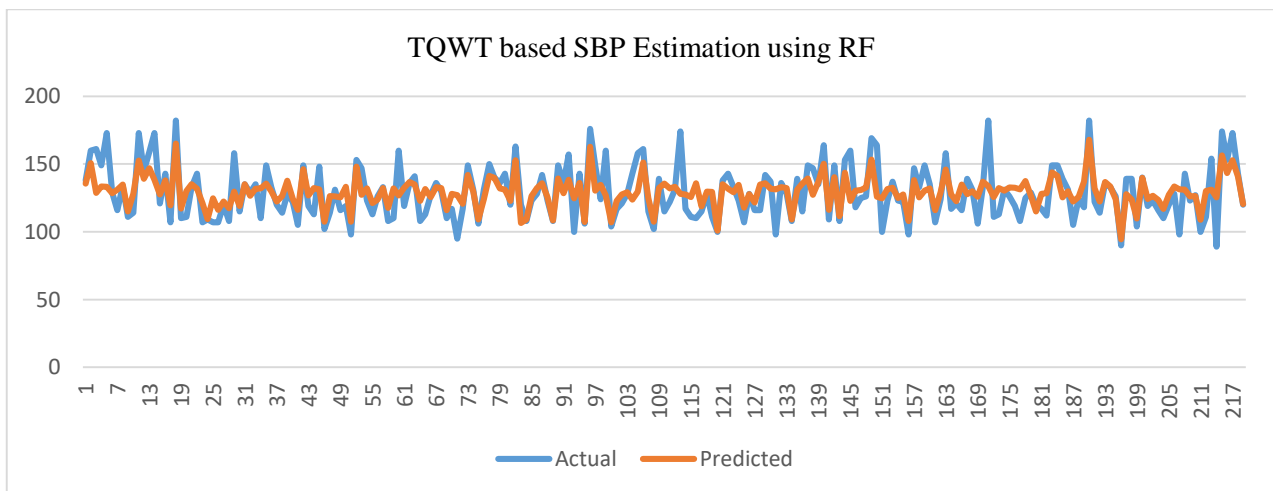


Figure 5. TQWT based SBP Estimation using RF

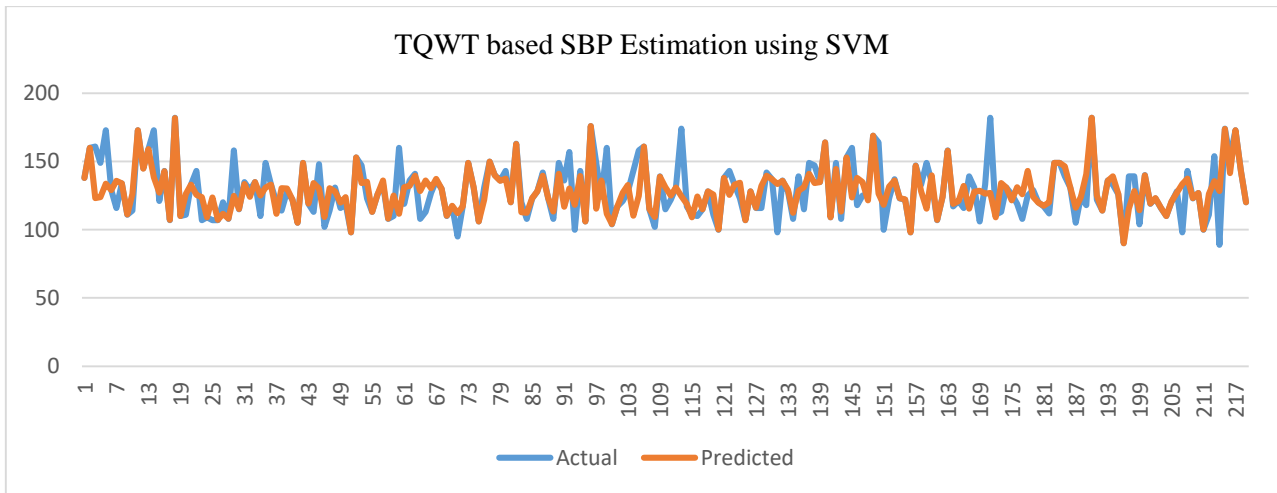


Figure 6. TQWT based SBP Estimation using SVM

Table 3. Normalized Correlations and Error Rates for TQWT based SBP Estimation

Method	CC	MAE (mmHg)	RMSE (mmHg)
ANN	0.5716	7.5628	9.2981
RF	0.8391	7.2694	8.1719
SVM	0.8107	6.7648	9.4167

HR estimations performed using ANN, RF and SVM methods can be seen in Figures 7, 8, and 9.

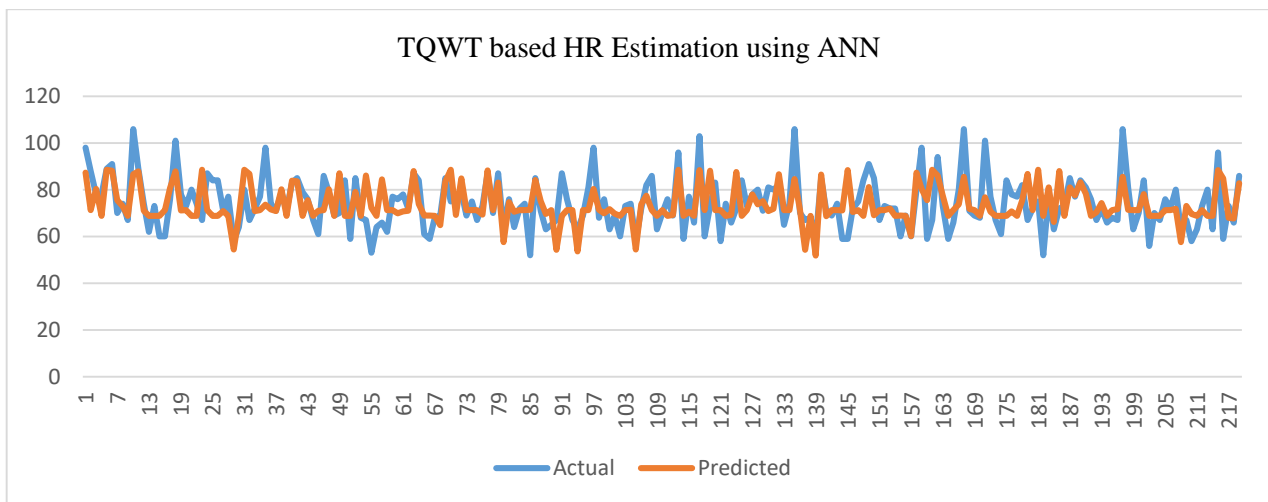


Figure 7. TQWT based HR Estimation using ANN

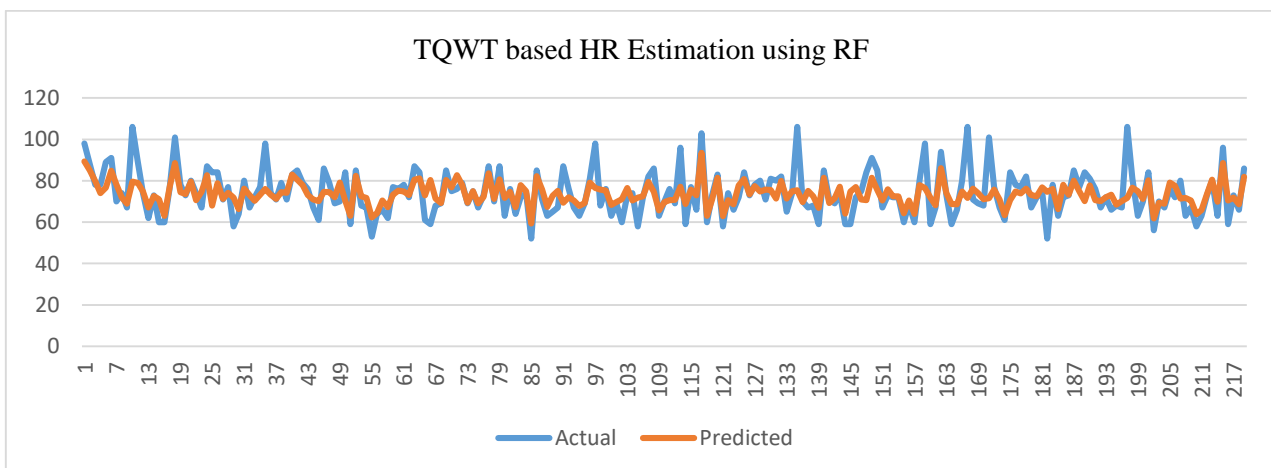


Figure 8. TQWT based HR Estimation using RF

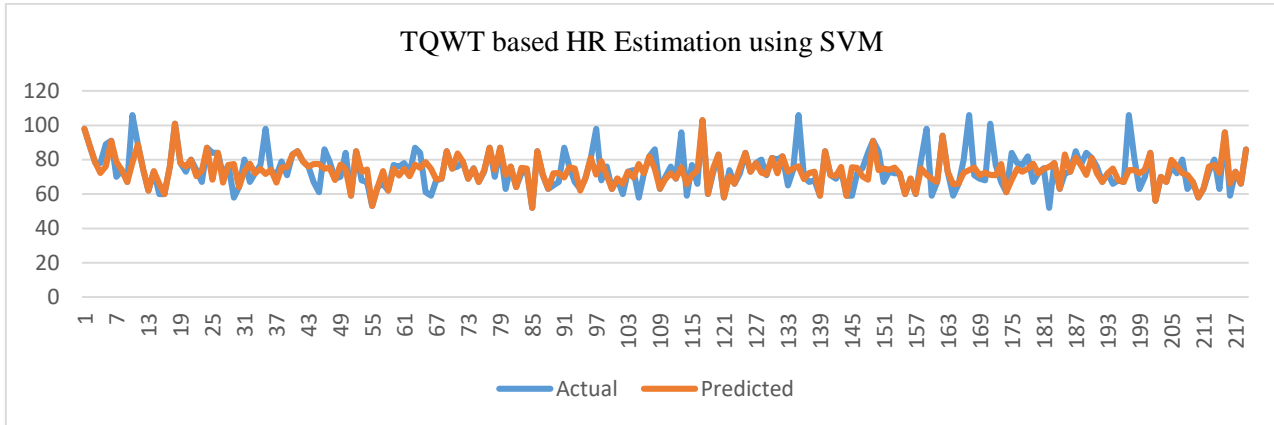


Figure 9. TQWT based HR Estimation using SVM

Table 4. Normalized Correlations and Error Rates for TQWT based HR Estimation

Method	CC	MAE	RMSE
ANN	0.6180	6.3349	8.2164
RF	0.8117	4.2946	6.8852
SVM	0.7714	3.9872	6.6285

DISCUSSIONS

Standard of the Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI) can be used to analyze the performance of BP estimations. AAMI says that for reliable BP estimation, the maximum MAE value between estimated and reference BPs must be 5 mmHg. Our results show that the MAE values are in the standard for DBP estimations with RF and SVM. However, for SBP estimations, MAE values of our results are little bit higher than the standard value. We think that the reason of this performance decrease is the high variance of SBP set. High variance makes the regression analysis more challenging.

The correlation coefficient in the estimations of DBP with the TQWT method using the RF algorithm is higher than the correlations coefficients in the estimations performed using ANN and SVM algorithms. As seen in Table 2, the error rates in the estimations performed using ANN algorithm appear to be higher than the other algorithms. Correlation coefficients show that the estimation of SBP with the TQWT method using RF algorithm is higher than the other algorithms. As seen in Table 3, no significant difference was seen between the error rates in the estimations performed with all of the machine learning algorithms.

The values of the correlation coefficients and error rates for the estimation of HR using the machine learning algorithms of ANN, RF and SVM, and the analysis method of TQWT are shown in Table 4. As it can be seen, the correlation coefficient of the estimations performed using the RF algorithm is higher than the correlation coefficients of the estimations performed using the other algorithms. The correlation coefficient of the estimations performed using the ANN algorithm is quite lower and the error rates are quite higher compared with the other algorithms. It is obvious that the ANN algorithm is not suitable for determining HR.

As it can be seen in the tables, when the CC, MAE, and RMSE values are compared one by one for each method in the BP and HR estimation study using the features extracted by the TQWT method, it is observed that the RF method yields the best results with high accuracy. When the estimations performed using the RF method, it is seen that the CC is 0.7219 for DBP, 0.8391 for SBP, and 0.8117 for HR.

CONCLUSIONS

In this paper, it was aimed to estimate BP levels and HR based on the PPG signals. The PPG signals were separated into their sub-bands using the TQWT method, and the statistical features were extracted from each sub-band and the main signal. The extracted features were subjected to regression analysis by machine learning methods, and the BP levels and HR values were estimated.

Results show that the PPG signals are very useful to monitor some important biomedical values. Easy recording and processing of PPG signals make them promising for medical applications. Monitoring the BP and HR levels using wearable devices will be possible with high accuracies in the next years.

Performance of the wavelet decomposition increases because of the flexible algorithm of TQWT. Controlling the characteristics of mother wavelet makes the method appropriate for non-stationary signals like the biomedical ones. Using of TQWT effected the results of this research positively. However, it is obvious that the proposed method needs more improvements. Some of the new and promising decomposition methods and time-frequency analysis techniques can be employed instead of TQWT for obtaining better performance.

The correlation coefficients and error rates demonstrate that the best estimation results are obtained with the RF algorithm. However, in general, estimation results are not successful enough to replace conventional measurement methods in practice. It is supposed that higher estimation results can be obtained if the features which are different from the ones used in this study and more suitable for the purpose of this study are used. For the future research, it is projected to obtain more successful estimation results by trying some new and powerful analysis methods in conjunction with the TQWT and using different time and frequency domain features of the signals. Also, using a different dataset which includes more data might improve the estimation results.

REFERENCES

- Acharya, U. R., Hagiwara, Y., Koh, J. E.W., Oh, S. L., Tan, J. H., Adam, M., and San Tan, R., (2018), Entropies for automated detection of coronary artery disease using ecg signals: A review, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 373–384.
- Al Ghayab, H. R., Li, Y., Siuly, S., and Abdullah, S., (2019) A feature extraction technique based on tunable q-factor wavelet transform for brain signal classification, *Journal of neuroscience methods*, vol. 312, pp. 43–52,.
- Allen, J., & Murray, A.,(2003), Age-related changes in peripheral pulse shape characteristics at various body sites, *Physiological Measurement*, 24(2), 297–307.
- Allen, J.,(2007), Plethysmography and its application in clinical physiological Measurement, *Physiological Measurement*, 28(3), 1-39.
- American National Standards Institute (2023). Non-invasive sphygmomanometers - Part 2: clinical investigation of automated measurement type. ANSI/AAMI/ISO 81060–2:2013. <http://webstore.ansi.org>, Accessed September 26,.
- Bagha, S., & Shaw, L. ,(2011), A real time analysis of PPG signal for measurement of SpO2 and Pulse Rate, *International Journal of Computer Applications*, 36(11),45-50.
- Büyüköztürk, K., (1999), Turkish cardiology association national hypertension treatment and follow-up guide, <https://tkd.org.tr/kilavuz/k03.htm>, [Visited: 13/03/2021].
- Engel, T.A., Charao, A.S., Pinheiro, M.K., & Steffemel, L.A.,(2014), Performance Improvement Of Data Mining in Weka Through GPU Acceleration, *Procedia Computer Science*, 32, 93 – 100.
- Gao, S.C., P. Wittek, L. Zhao, W.J. Jiang, (2016) Data-driven estimation of blood pressure using photoplethysmographic signals, August 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, pp. 766-769.
- Han, J., Pei, J., and Kamber, M., (2011) *Data Mining: Concepts and Techniques*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Hertzman A.B., (1938), The blood supply of various skin areas as estimated by the photoelectric plethysmograph, *American Journal of Physiology*,24(2), 328– 340.
- Johnston,W.,(2006), Development of a Signal Processing Library for Extraction of SpO2, HR, HRV, and RR from Photoplethysmographic Waveforms, Thesis (Msc) Worcester Polytechnic Institute.
- Kraitl, J., Hartmut E.,(2005), Optical non-invasive methods for characterization of the human health status, 1st International Conference on Sensing Technology, 21-23 November 2005 Palmerston North, New Zealand.
- Kurylyak, Y., Lamonaca, F., and Grimaldi, D., (2013) A Neural Network-based method for continuous blood pressure estimation from a PPG signal, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), , pp. 280-283.

- Liang, Y., Chen, Z., Liu, G., & Elgendi, M., (2018), A new short-recorded photoplethysmogram dataset for blood pressure monitoring in China, *Scientific Data*, 5.
- McDuff D., Gontarek S. & Picard R. W.,(2014), Remote detection of photoplethysmographic systolic and diastolic peaks using a digital camera, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(12), 2948-2954.
- Nafisi, V. B. & Shahabi, M, (2018), Intradialytic hypotension related episodes identification based on the most effective features of photoplethysmography signal. *Comput. Methods Programs Biomed.* 157 (4), 1–9.
- Rastegar, S., Gholamhosseini, H., Lowe, A., Mehdipour, F. and Lindén, M., (2019). Estimating Systolic Blood Pressure Using Convolutional Neural Networks, *Studies in health technology and informatics*, 261, 143-149, , PMID: 31156106.
- Schlesinger, O., Vigderhouse, N., Eytan, D. and Moshe, Y., (2020). Blood Pressure Estimation from PPG Signals Using Convolutional Neural Networks and Siamese Network, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 1135-1139, DOI: 10.1109/ICASSP40776.2020.9053446.
- Selesnick, I. W., (2011), Wavelet transform with tunable Q-factor, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59(8), 3560–3575.
- Shin H. S., Lee C., & Lee M.,(2009), Adaptive threshold method for the peak detection of photoplethysmographic waveform, *Computers in Biology and Medicine*, 39(12), 1145-1152.
- Teng, X. F. and Zhang, Y. T., (2003). Continuous and noninvasive estimation of arterial blood pressure using a photoplethysmographic approach, *Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat. No. 03CH37439)*. Vol. 4. IEEE.
- Übeyli, E. D., Cvetkovic, D., & Cosic, I., (2010), Analysis of Human PPG, ECG and EEG Signals by Eigenvector Methods, *Digit. Signal Process*, 20 (3), 956–963.
- Xing, X., Sun, M., (2016). Optical blood pressure estimation with photoplethysmography and FFT-based neural networks, *Biomed. Opt. Express*, 7 (8), pp. 3007-3020.
- Yousef Q., Reaz M. B. I., Ali, M. A. M. (2012), The analysis of PPG morphology: investigating the effects of aging on arterial compliance, *Measurement Science Review*, 12(6), 266-271.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.07.2023
Kabul Tarihi : 17.10.2023

Received Date : 05.07.2023
Accepted Date : 17.10.2023

DOKU MÜHENDİSLİĞİ UYGULAMALARI İÇİN GELİŞTİRİLEN TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME CİHAZLARI

PORTABLE ELECTROSPINNING DEVICES DEVELOPED FOR TISSUE ENGINEERING APPLICATIONS

Merve YILMAZ^{1,2*} (ORCID: 0009-0009-7584-1035)
Nazmi EKREN³ (ORCID: 0000-0003-3530-9262)

¹Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

²Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, İstanbul, Türkiye.

³Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye.

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Merve YILMAZ, merveyilmz00@gmail.com

ÖZET

Bu makale, doku mühendisliği uygulamalarına odaklanarak taşınabilir elektroegirme teknolojisindeki mevcut gelişmeleri bir araya getirmektedir. Elektroegirme, nanofiber üretimi için kullanılan bir yöntemdir ve son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Ancak, elektroegirme cihazları genellikle büyük ve ağır olduklarından sadece laboratuvar ortamında kullanılmaya elverişlidir. Bu nedenle yara ve yanık tedavisi gibi acil tıbbi müdahale gerektiren laboratuvar dışı uygulamalarda büyük önem taşımaktadır. Cilt yenilenmesi ve doku mühendisliği alanında da umut verici sonuçlar vermektedir. Bu makalede taşınabilir elektroegirme cihazları iki ana kategoriye ayrılacak ve her bir bölüm ait örnekler incelenecektir. İlk kategori, şebekeye bağlı çalışan taşınabilir elektroegirme cihazlarıdır. İkinci kategori, pille çalışan taşınabilir elektroegirme cihazlarıdır. Her iki kategoriye ait elektroegirme cihazlarının kullanımı ve avantajları hakkında detaylı bir inceleme yapılmaktadır. Ayrıca bu makale, taşınabilir elektroegirme cihazlarının doku mühendisliği uygulamalarında kullanımına dair bilgi vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektroegirme, nanofiber, taşınabilir cihaz, doku mühendisliği, yara örtüsü.

ABSTRACT

This article brings together current developments in portable electrospinning technology, focusing on tissue engineering applications. Electrospinning is a method used for the production of nanofibers and has gained significant interest in recent years. However, electrospinning devices are generally large and heavy, making them suitable only for use in laboratory settings. Therefore, portable electrospinning devices are of great importance for applications outside the laboratory, particularly in emergency medical situations requiring rapid and effective intervention, such as wound and burn treatment. It also shows promising results in the fields of skin regeneration and tissue engineering. This article will divide portable electrospinning devices into two main categories and examine examples from each category. The first category is portable electrospinning devices that work connected to the grid, and the second category is portable electrospinning devices that work on batteries. A detailed review is conducted on each category's use and advantages of electrospinning devices. This article provides information on the use of portable electrospinning devices in tissue engineering application.

Keywords: Electrospinning, nanofiber, portable device, tissue engineering, wound dressings.

GİRİŞ

Doku mühendisliği, canlı dokuların ve organların yeniden üretilmesi, onarılması ve geliştirilmesi için multidisipliner bir yaklaşımdır. Günümüzde doku mühendisliği, biyoloji, biyomühendislik, kimya, malzeme bilimi, fizik, matematik ve bilgisayar bilimleri gibi birçok farklı disiplinden gelen araştırmacılar tarafından yönlendirilmektedir. Doku mühendisliği, yeniden üretilen dokuların vücuttaki hasarlı veya kayıp dokuların yerini alması amacıyla kullanılmasını hedeflemektedir. Bu amaçla, doku mühendisliği araştırmaları, hücrelerin, materyallerin ve biyolojik sinyallerin kombinasyonu ile yeniden oluşturulan 3 boyutlu yapılar veya biyomalzemeler geliştirmektedir. Doku mühendisliği, tıbbi uygulamalarda yanıklar, yaralanmalar, enfeksiyonlar veya hastalıklar nedeniyle hasar gören deri veya kemiklerin onarımı gibi alanlarda kullanılabilir. Ancak, bu alanda yapılan çalışmaların başarısı, uygun teknolojilerin geliştirilmesine de bağlıdır (Acar, 2007).

Elektroegirme yöntemi, son yıllarda doku mühendisliği alanında kullanılan en yaygın ve etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntem, elektrostatik kuvvetlerin kullanımı ile polimerik çözümlerden nanofiberlerin üretilmesini sağlar. Bu nanofiberler, hasarlı dokuların onarımı için kullanılabilir (Şimşek, 2018). Elektroegirme yöntemi, ince ve homojen fiberlerin üretilmesi, yüksek yüzey alanı, yüksek gözeneklilik ve biyoyumluluk gibi avantajları nedeniyle doku mühendisliği uygulamalarında tercih edilmektedir. Yaralı dokunun bakımında, fiberlerin nano ölçekteki boyutları, enfeksiyon kaynaklarına karşı fiziksel koruma sağlamaktadır. Hava değişimini düzenleyerek hemostazi indüklemekte ve yara bölgesinde yumuşak doku rejenerasyonuna katkıda bulunmaktadır (Suepueren vd., 2007). Bununla birlikte, elektroegirme yöntemi bazı sınırlamalara da sahiptir. Özellikle elektroegirme cihazları büyük boyutlu ve sabit cihazlar olmaları nedeniyle bu yöntemi çoğunlukla laboratuvar ortamlarında uygulanmaktadır (Durmuş vd., 2017). Bu durum, mobilite ve hızlı müdahale gerektiren acil durumlarda elektroegirme yönteminin kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle, taşınabilir elektroegirme cihazları geliştirilmiştir. Bu cihazlar, elektroegirme yöntemini her yerde kullanılabilir hale getirmektedir. Özellikle yara ve yanık gibi acil müdahale gerektiren durumlarda, taşınabilir elektroegirme cihazları hızlı ve etkili bir tedavi sağlayabilmektedir (Yan vd., 2016). Bu makalede, taşınabilir elektroegirme cihazları konusunda detaylı bir inceleme yapılacaktır. Şebekeye bağlı çalışan ve pille çalışan cihazlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılacaktır.

ELEKTROEGİRME YÖNTEMİ

Elektroegirme, mikron ile nanometre arasında değişen boyutlarda çok ince fiberler üretmek için elektrostatik kuvvetleri kullanan basit ve çok yönlü bir yöntemdir (Huang vd., 2006; Long vd., 2022). Bu yöntem, doğal (Chen vd., 2008), sentetik (Ma vd., 2005), biyolojik olarak parçalanabilen, parçalanamayan (Kim vd., 2007; Maretschek vd., 2008) veya bunların karışımları dâhil olmak üzere birçok farklı polimer türünden fiberler üretmek için kullanılmaktadır (Deng vd., 2007).

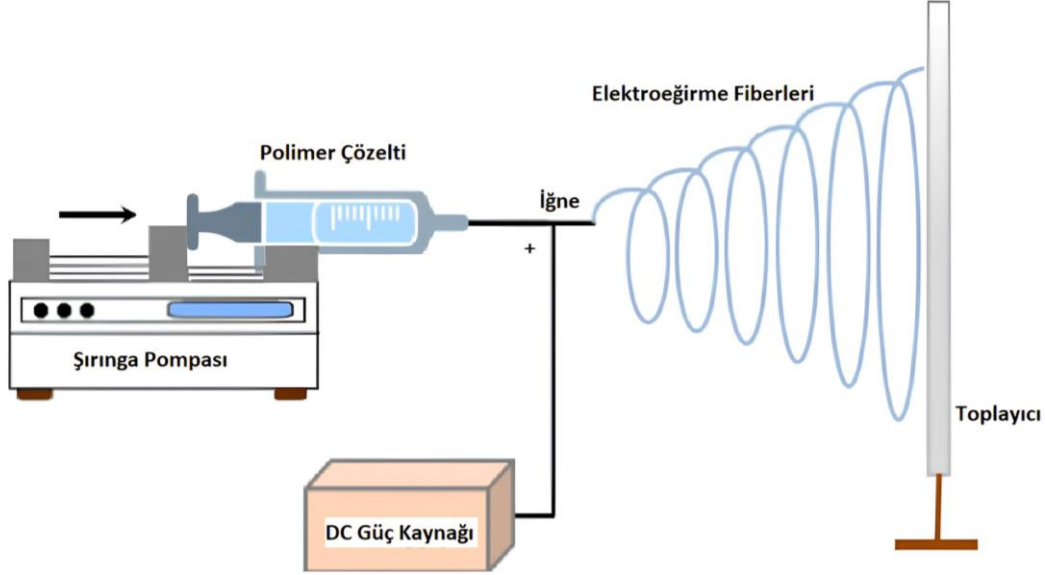
Elektroegirme yöntemi, geleneksel fiber üretme yöntemleriyle üretilen fiberlere göre daha geniş bir yüzey alanı ve daha küçük gözenek çaplarına sahip fiberler üretmektedir. Çok yönlü bir yöntem olan elektroegirme doku mühendisliği, ilaç taşıma, filtreleme ve algılama gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir (Esentürk vd., 2016). Bu nedenle birçok araştırma uygulaması için en başarılı ve popüler seçenektir. Diğer tekniklerle kıyaslandığında basit, çok yönlü ve uygun maliyetli olması başlıca avantajlarıdır (Reneker & Yarin, 2008). Nano ve mikro partiküller üreten elektropüskürtmeye benzer şekilde, elektroegirme, bir polimer çözeltisinden nano ölçekli ve mikro ölçekli fiberler üretmek için yüksek voltajlı elektrik yükleri kullanılmaktadır (Bhushani & Anandharamkrishnan, 2014).

Elektroegirme Yönteminin Temelleri ve Çalışma Prensibi

Polimer çözeltisi sabit bir hızda şırıngadan veya püskürtücüden pompalanır ve iğneye yüksek voltaj uygulanmaktadır. Bu elektrik alan, polimer çözeltisini uzatarak ince bir jet haline getirir, bu da ardından sallanma ve bükülme kararsızlığına uğrayarak sürekli bir fiber oluşturmaktadır. Elektroegirme işlemi temel olarak dört ana bileşenden oluşmaktadır: içine konulan çözeltiyi beslemek için pompa, iğne uçlu şırınga, topraklanmış iletken toplayıcı ve yüksek voltajlı güç kaynağı. Uygulanan yüksek voltajın bir sonucu olarak elektroegirme işlemi sırasında, iğne ucundaki polimer çözelti damlacığı elektrostatik kuvvetler altında "Taylor konisi" adı verilen bir koniye dönüşmektedir (Santangelo, 2019).

Elektroegirme yöntemi, öncelikle polimerin uygun bir çözücüde çözündürülmesi ile başlamaktadır. Daha sonra, Şekil 1' de görüldüğü gibi polimer çözeltisi besleme ünitesine(şırınga) yerleştirilip, besleme ünitesinin iğnesi ile topraklanmış metalik toplayıcı arasına yüksek gerilim güç kaynağı bağlanarak bir elektrik alan oluşturulmaktadır. Bu

sayede, polimer çözeltisi içindeki polimerler elektrik alanının etkisiyle birbirine çekilmekte ve metalik toplayıcıda birikmektedir. Belirli bir voltaj seviyesinin üzerinde, elektrostatik itme kuvveti, çözeltinin yüzey gerilimini yener ve ince bir polimer çözeltisi püskürtülür. Sıvının çoğu, şırınga iğnesinden tanımlanmış bir çalışma mesafesindeki toplayıcıya ulaşmadan önce çözeltiden buharlaşmaktadır. Çözücünün buharlaşmasıyla nanofiber formunda toplayıcı üzerinde katılaşmaktadır. Böylece nanofiber örtü oluşmaktadır (Williams vd., 2018).



Şekil 1: Elektroöğirme Yönteminin Şematik Görünümü (Alharbi vd., 2016).

Üretilen fiberlerin morfolojisi, çapı ve gözenekliliği oldukça önemlidir. Elektroöğirme fiberlerinin üretimini etkileyen en belirgin parametrelerin bir listesi Tablo 1' de sunulmaktadır. Genel olarak, elektroöğirme işlemi sırasında daha ince fiberler üretilebilmek adına toplayıcı ve düzenek arasındaki mesafeyi artırarak atış süresi uzatılmaktadır. Düşük uçuculuğa sahip solventlerin kullanılması ve solventin buharlaşma hızının artırılması için sıcaklığın yükseltilmesi de mümkündür. Bununla birlikte, çalışma mesafesini optimum değerine çıkarmanın, homojen olmayan fiberlere yol açabileceği ve dallanma ile sonuçlanabileceği unutulmamalıdır (Asmatulu & Khan, 2018; Williams vd., 2018).

Tablo 1: Elektroğirme Sırasında Elektroğirme Fiberlerinin Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin Listesi (SalehHudin vd., 2018; Teo vd., 2011).

Elektroğirme Yöntemini Etkileyen Parametreler	Etkileri
Çalışma Mesafesi	- Mesafeyi optimum değer altına indirmek daha kalın fiberler ve morfolojik kusurlar oluşturmaktadır. - Mesafenin artması daha ince fiberler oluşturmaktadır. Ancak artan korona deşarjına ve Rayleigh kararsızlığına yol açarak kritik bir mesafenin ötesinde boncuklu veya erimiş fiber kusurlarına neden olabilmektedir.
Gerilim	- Polimer çözeltisinin yüzey geriliminin üstesinden gelmek ve bir jeti sürdürmek için kritik voltaj aşılmalıdır. - Voltajı arttırmak, uçuş süresini azaltır, fiber çapını artırır ve kritik bir noktanın üzerinde düzensiz jetleri ve boncuk oluşumunu indükler ve bunun tersi de geçerlidir.
Akış Hızı	- Akış hızını artırılması, düşük esneme, daha büyük gözenek boyutu ve kritik değer üzerinde fiber çapı oluşturmaktadır.
Düzenek Deliği	- Daha küçük düzenek delik çapı, daha dar fiberler oluşturur ve morfolojik kusurları azaltır. Böylece nozülün tıkanma olasılığını da artırır. - İçi boş veya karışık fiber morfolojisi mümkündür.
Toplayıcı Geometrisi	- Farklı toplayıcı şekilleri ile farklı fiber düzenlemeleri elde edilebilir. Dönen tambur, plaka, disk vb. dâhil olmak üzere geometrilerle hizalı, çapraz dizili, örgülü, nanoweb veya bobin fiberleri elde edilebilmektedir.
Polimer Yoğunluğu ve Viskozite	- Polimer yoğunluğu, elektroğirme yöntemi sırasında kullanılan polimer çözeltisinin konsantrasyonunu ifade etmektedir. Polimer yoğunluğu arttıkça, elde edilen nanofiberlerin çapı genellikle azalır. Ayrıca, yüksek polimer yoğunluğu, nanofiberlerin düzenliliğini artırabilir ve daha homojen bir yapı oluşturabilmektedir. - Polimer çözeltisinin viskozitesi, nanofiberlerin çekilme sürecini etkileyebilir. Viskozite düşük olduğunda, polimer çözeltisi daha kolay şekil verilebilir ve daha ince fiberler elde edilebilir. Ancak, çok düşük viskozite, nanofiberlerin stabilitesini azaltabilir ve polimer damlacıklarının oluşmasına neden olabilmektedir.
Polimer Çözeltisinin Elektrik İletkenliği	- Elektroğirme yönteminde, uygun iletkenlik özellikleri, polimer çözeltisinin yüksek gerilim alanında şarj birikimini teşvik ederek jet patlamasını daha az voltaj gerektirecek şekilde oluşmasına yardımcı olur. Ancak, yüksek iletkenliğin olması, çevredeki havaya elektrik boşalması nedeniyle kararsız çoklu püskürtmeye neden olabilir. Bu durumda, optimum iletkenliği sağlamak için, polimer çözeltisinin iletkenlik özellikleri dikkatlice kontrol edilmeli ve ayarlanmalıdır.
Çözücü Uçuculuğu	- Yeterince uçucu çözümler, fiberlerin toplayıcıda ıslak füzyonunu önlemektedir. Son derece uçucu çözümler, yeterli uzama olmadan erken katılaşarak, morfolojik kusurlar, ince fiber üretimini engellemekte ve düzenekte tıkanma riskini arttırmaktadır.
Bağıl Nem	- Artan nem, çökmeden önce katılaşmada gecikmeye neden olmaktadır. Bu nedenle uzama süresini artırır ve daha ince fiberler oluşturmaktadır. - Yüksek nemin (>%60), özellikle polivinil pirolidon (PVP) gibi higroskopik polimerler için düzgün olmayan erimiş fiberler ürettiği bilinmektedir. Polimer suda çözünmezse, polimerin çökmesi düzeneğin tıkanmasına, daha kalın çaplara, morfolojik kusurlara ve faz ayırmasına atfedilen diğer sorunlara neden olabilmektedir.
Sıcaklık	- Sıcaklık arttıkça çözelti viskozitesi azalır ve elektrik iletkenliği artar, bu da daha büyük polimer zincir hizasına sahip ince tekdüze fiberlerin oluşumuna olanak tanımaktadır. Ancak, sıcaklığın artması, aynı zamanda katılaşmadan önce buharlaşma ve uzama süresinde azalmaya neden olabilir ve bu da daha ince fiberlerin oluşumunu engelleyebilmektedir.

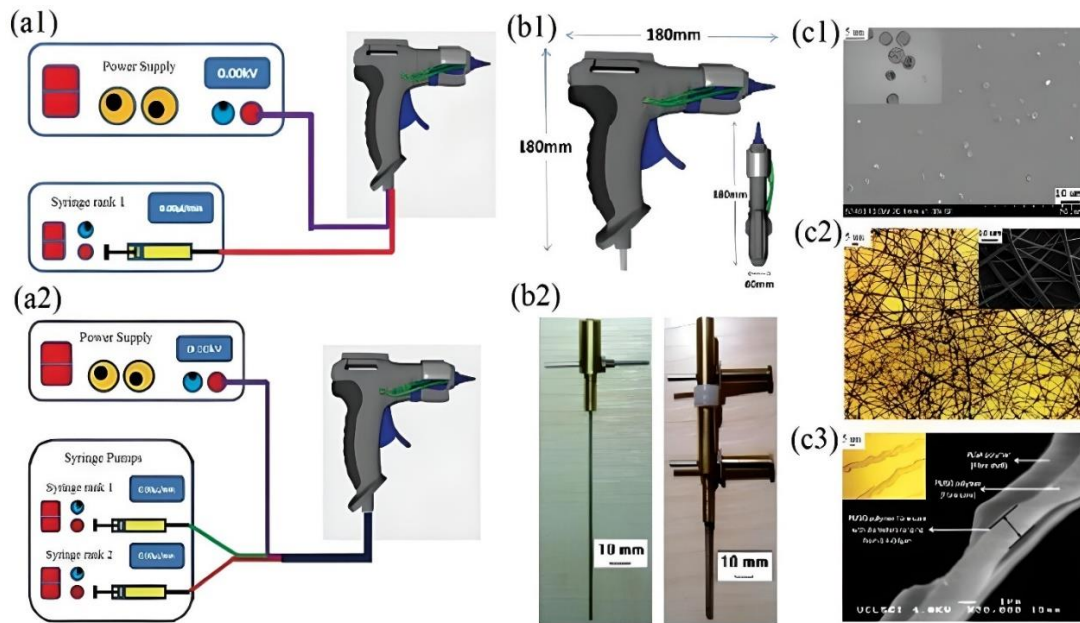
TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME CİHAZLARININ TEMELLERİ

Taşınabilir elektroegirme cihazları, nanotıp ve nanoteknolojide geleneksel elektroegirme cihazlarının dezavantajlarından kaçınmak için tasarlanmıştır. Tek seferlik anlık fiber üretimi sağlayan bu cihazların hareketliliği, laboratuvar harici ortamlarda elektroegirme imkânı tanımaktadır. Taşınabilir elektroegirme cihazlarının hareketliliği ve yerinde elektroegirme imkânı, yara iyileştirme ve benzeri uygulamalar için birçok potansiyel fayda sağlamaktadır. Diğer birçok taşınabilir aygıtta olduğu gibi, makinenin geri kalanı elle taşınamayacak kadar büyük ve ağır olduğundan, bu aygıtların yalnızca düzener bileşeni taşınabilir olan tasarımları da mevcuttur. Öte yandan, taşınabilir elektroegirme cihazları, ihtiyaç anında uygulama için yüksek verimli fiberler üretirken, esas olarak cilt yenileyici nitelikler (Dong vd., 2020; Liu vd., 2018) ve hızlı hemostaza (Zhou vd., 2020) sahip yara pansumanlarında uygulanmaktadır (Liu vd., 2020; Zhang vd., 2020).

Taşınabilir elektroegirme cihazı modelleri:

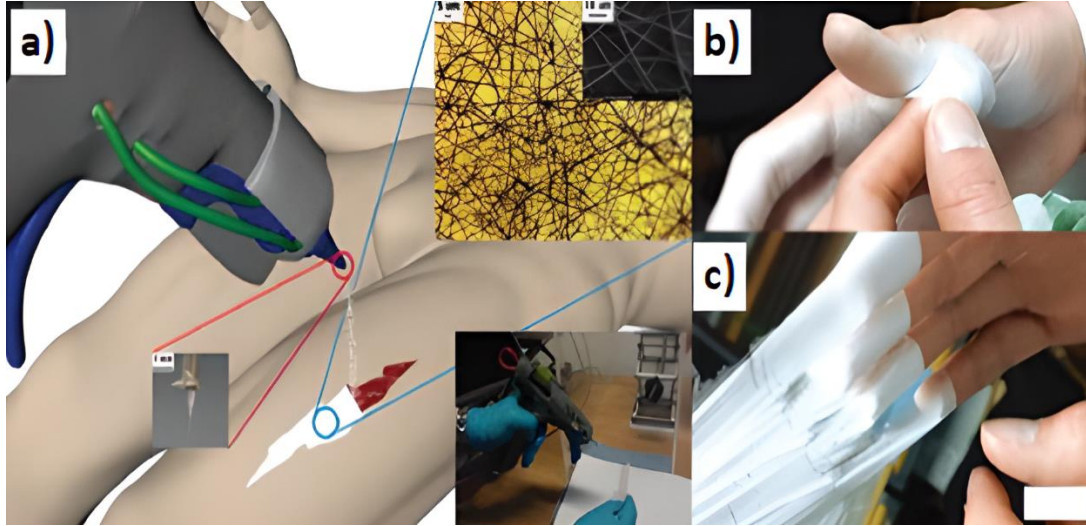
- Şebekeye (ana elektrik hattına) bağlı çalışan elektroegirme cihazları,
- Pille çalışan elektroegirme cihazları.

Şebekeye bağlı yerinde elektroegirme cihazları



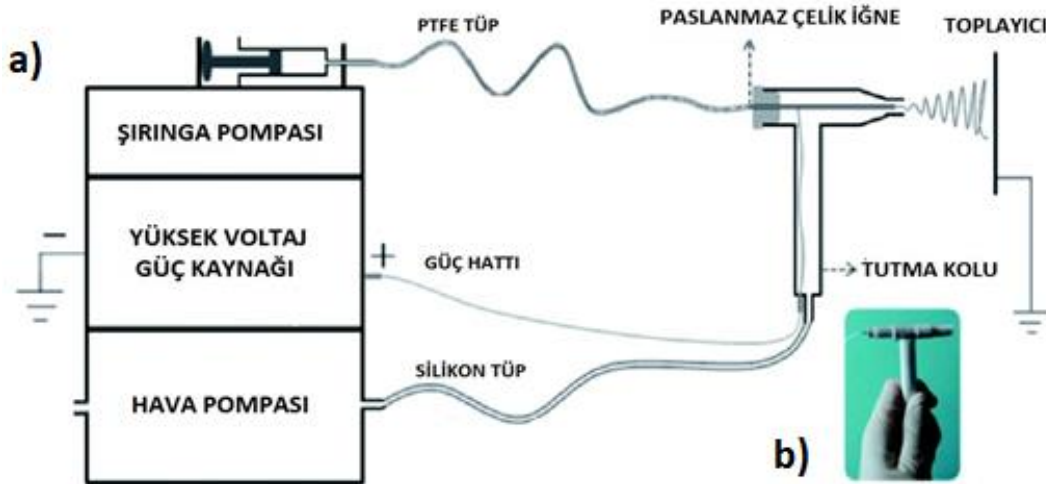
Şekil 2: (a1) Bir veya (a2) İki Şırınga ile Taşınabilir Bir Elektroegirme Düzeneginin Şeması. (b1) Elde Tutulan Düzenek Şu Şekilde Tasarlanmıştır: (b2) Tek Ve Çok Eş Eksenli Bir İğnenin (c1) Partiküller, (c2) Fiber Keçeler ve (c3) Eş Eksenli Fiberler Üretmek Üzere Bir Araya Getirildiği Bir Püskürtme Aracıdır (Sofokleous vd., 2013).

Sadece laboratuvar ortamında kullanılabilen makro büyüklükteki elektroegirme cihazları yerinde elektroegirme yapabilmek için çeşitli şekillerde küçültülüp taşınabilir hale getirilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Edirisinghe ve ark. aittir. Şekil 2(a1-a2)' de tasarımı görülen taşınabilir elektroegirme cihazı Şekil 2(b1-b2)' de gösterildiği gibi tek veya çift koaksiyel iğne ucundan akacak şekilde tasarlanmış bir polimer püskürtme mekanizmasına sahiptir. Şekil 2(c1-c3)' te gösterildiği gibi sınırlı bir alanda cihazın çalışma performansı incelenip poli (laktik-ko-glikolik) asit (PLGA) partikülleri, fiberleri ve ayrıca PLGA/polimetilsilseksuoksan (PMSQ) çekirdek-kabuk fiberleri üretilmiştir. Şebekeye bağlı olarak çalışan bu cihazı Edirisinghe ve ark. çok iğneli elektrohidrodinamik (EHD) püskürtme tabancası olarak adlandırmışlardır. EHD püskürtme tabancasında tek iğneli sisteme 250 µl/dk sabit akış hızında %25' lik bir PLGA solüsyonu verilir optimum çalışma koşulları belirlemişlerdir. Edirisinghe ve ark. yaptıkları çalışmalara göre elektroegirme tabancasının kararlı koni jeti, 13.5 kV uygulanan bir voltajda oluştuğunu ortaya çıkarmışlardır. PLGA elektroegirme fiberleri mikroskop cam lamaları üzerinde toplanmış ve ~5 dakikada toplanan fiberlerle, 2 mm kalınlığında bir PLGA yaması üretmişlerdir (Lau vd., 2014; Sofokleous vd., 2013).



Şekil 3: (a) Yerde Kullanım İçin Portatif Bir Elektroğirme Düzeninin Şeması, (b) El Üzerine Oluşturulan Fiber Bazlı Film ve (c) Filmin Çıkarılması (Lau vd., 2014; Yan vd., 2019)

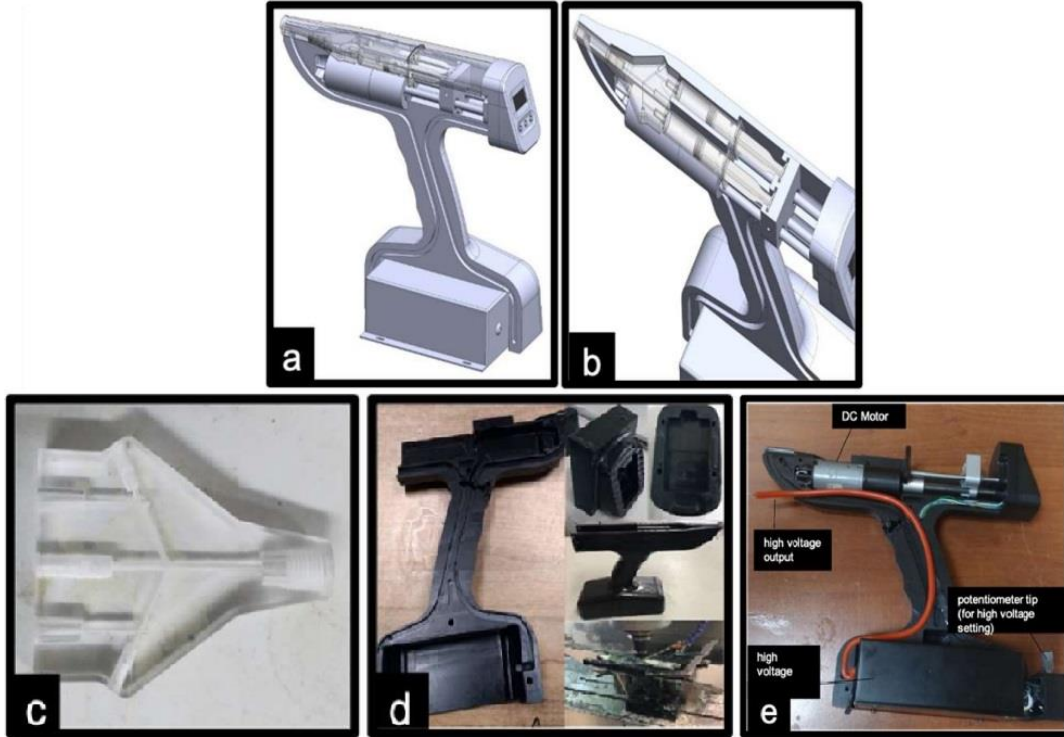
Doku mühendisliği çalışmalarında kullanılan elektroğirme cihazı, biyomalzemeleri yaranın etrafında toplayarak iyileşme sürecini hızlandırmak için nanofiberler üretmektedir. Kesik bir yaranın iyileşmesinde kullanılan bu nanofiberler, yaranın korunması amacıyla uygulanmaktadır. Şekil 3(a)' da gösterildiği gibi, taşınabilir cihaz PLGA fiberlerini kesik yara veya sıyrık yüzeyi gibi bir hedef alan üzerine yatırmak için pratik bir yöntem sağlamaktadır. Cihaz tarafından püskürtülen polimer, çözücünün buharlaşması ile kalıplaşıp ince bir film tabakası haline gelmektedir. Cihaz Şekil 3(b)' deki ince koruyucu film katmanını, 300 saniye içinde oluşturabilmektedir. Ayrıca şekil 3(c)' de yaralı yüzeyin iyileşmesine bağlı olarak ince filmin, değiştirilmek veya çıkarılmak istenildiğinde kolayca esnetilip soyularak çıkarılabildiği gösterilmektedir (Jiang vd., 2014).



Şekil 4: (a) Hava Akımı Yönlendirmeli Yerde Elektroğirme Cihazının Şematik Gösterimi. (b) Tasarlanan Başlık (Jiang vd., 2014).

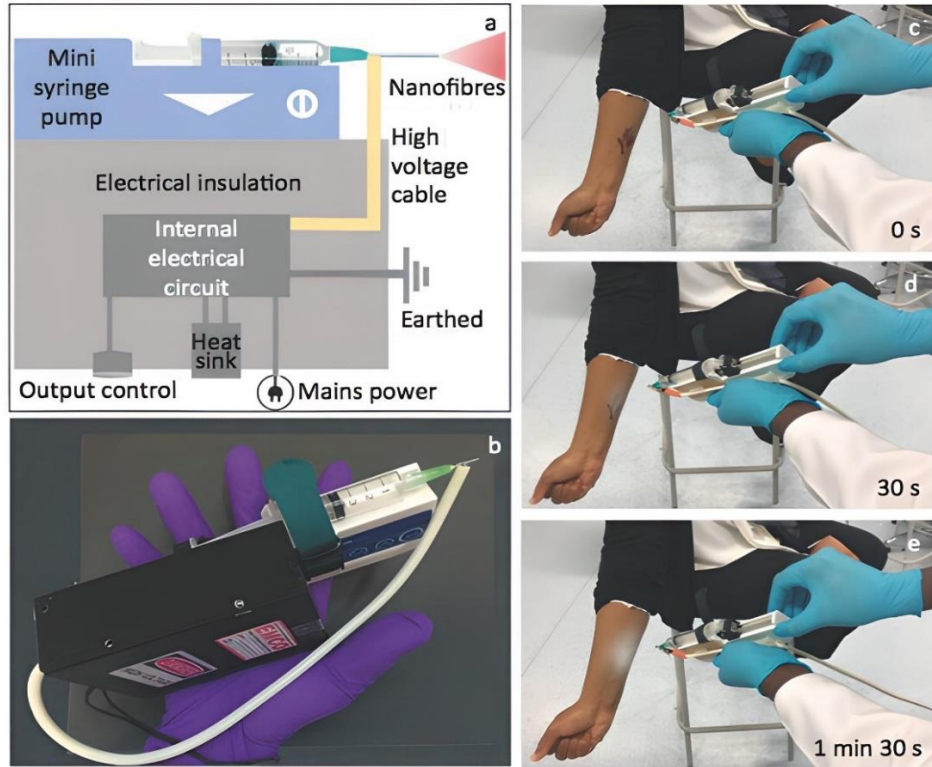
Edirisinghe ve ark. cihazına benzer olarak Long ve ark. hızlı hemostaz için hava akışı yönlendirmeli şebekeye bağlı bir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. Taşınabilir elektroğirme cihazı Edirisinghe ve ark. elektroğirme tabancasına benzer bir tasarımdadır. Şekil 4' de gösterildiği gibi, taşınabilir elektroğirme cihazı temel olarak dört öğeden oluşmaktadır: yüksek voltajlı bir güç kaynağı, bir şırınga pompası, bir hava pompası ve koaksiyel düzenek. Cihazın yüksek voltaj güç kaynağı 6-10 kV aralığında çalışmaktadır. Hava pompası, Şekil 4(a-b)' de gösterildiği gibi elektroğirmeye yardımcı olmak ve fiber biriktirme aralığını kontrol etmek için koaksiyel düzeye bağlanmıştır. Long ve ark. geliştirdiği elektroğirme cihazın deneylerini, küçük yaralarda ve kesiklerde iyileştirme uygulamaları amacıyla oktil siyanoakrilat (OCA) fiberlerinin doğrudan domuz karaciğer ve akciğer dokuları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ile Long ve ark. *in vivo* domuz karaciğerinde hemostazı tamamlamışlardır. Yara,

yerinde elektroğirme ile hava yönlendirilerek fiber film tabakasıyla ort. 20 saniyede hızlıca kapatılmıştır (Jiang vd., 2014). Yerinde hassas elektro çekim ile *in vivo* hemostaz için OCA medikal yapıştırıcının geleneksel püskürtmesi karşılaştırıldığında, eski yöntemin hassas fiber biriktirme, yüksek verimlilik ve düşük doz gibi avantajları bulunmaktadır (Dong vd., 2015).



Şekil 5: (a,b) Cihazın 3D Görüntüsü, (c) Polimer Sıvının Enjekte Edilmek İçin Birleştiği Kısım (Mikroçip), (d) Cihazın Diğer Kısımları, (e) Cihazın İç Görünümü (Ekren & Karacan, 2022).

Karacan ve Ekren 30 kV' a kadar yüksek gerilim üretebilen kaynak kullanarak taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. 24 V anma gerilimi, 0,275 A anma akımı, 200 Ncm anma torku ve 14 RPM anma hızına sahip DC motor kullanılmış ve şırınga pompası çalıştırılmıştır. Karacan ve Ekren tarafından elektroğirme cihazı olarak adlandırılan bu cihaz şebekeye bağlı olarak tasarlanmış ve 220 V AC gerilim 24 V DC gerilime dönüştürülmüştür. Farklı yüksek voltaj değerlerinde test edilmiş ve yüksek voltaj sırasında herhangi bir ısınma sorunu ile karşılaşmamıştır. Şekil 6(a-b-e)' de 3D tasarımları verilen cihaz bir el matkabı boyutu ve şeklindedir. Cihaz aynı zamanda 128x64 piksel çözünürlüklü 3-5 V çalışma gerilimi ve SPI / I2C ara yüz desteğine sahip, 6 adet pin ile kontrol edilebilen OLED ekran eklenmiş ve 8 bitlik mikrodenetleyici ATmega16A üzerine C programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Karacan ve Ekren Şekil 5(c-d)' de görüldüğü gibi elektroğirme işleminde kullanılacak polimerlerin birleştiği bir mikroçip tasarlamış ve çift şırıngadan gelen polimeri tek bir polimer akışı haline getirmişlerdir. Karacan ve Ekren çift şırınga kullanmasının başlıca nedeni yaraya birçok polimer çeşidini aynı anda elektroğirilebilmektir. Bu sayede yaralı bölgenin ihtiyacına yönelik farklı çalışmalar yapılabilir (Ekren & Karacan, 2022; Karacan, 2019).



Şekil 6: Taşınabilir EHD Cihazının (a) Şematik Diyagramı, (b) Mini Cihaz El Ünitesinin Montajını Gösteren Bir Fotoğraf. (c-e) Fiberlerin Simüle Edilmiş Bir Yara Bölgesine Yerleştirilmesi Sırasında Cihazın Gerçek Zamanlı Kaydının Anlık Görüntüleri (Brako vd., 2018).

Brako ve ark. Şekil 6(a-b)' da gösterildiği gibi basit ve ucuz bir taşınabilir elektroegirme cihazı önermiştir. Bu, hem minyatürleştirilmiş yüksek hassasiyetli bir mikro şırınga pompası, hem de 10 W' ta 33 kV' a kadar üretebilen minyatür bir yüksek voltaj güç kaynağından oluşturulmuştur. Düzenek ve güç kaynağı ünitesinin bir el ünitesine tam olarak entegre edilmesiyle, cihazın tamamı ağırlık olarak daha hafif ve daha taşınabilir hale gelmiştir. Böylece Şekil 6(c-e)' deki gibi şebeke gücü olan herhangi bir yerde kolayca kullanılabilir. Bu cihaz kullanılarak, selüloz asetat (CA) ve gümüş nanoparçacıklarla katkılanmış CA, Şekil 6(c-e)' de gösterildiği gibi, doğrudan simüle edilmiş yara bölgeleri üzerinde fiberler halinde başarıyla elektroegirilenmiştir. Şimdiye kadar gördüğümüz elektroegirme cihazları taşınabilir olmasına rağmen sadece düzenek elde tutulup geri kalan kısımları büyük ve ağır olması nedeniyle sabittir. Bu nedenle Ekren ve ark. ve Brako ve ark. diğer taşınabilir elektroegirme cihazlarına kıyasla daha kolay ve ucuz bir taşınabilir elektroegirme cihazı yapıp içerisine yüksek voltaj güç kaynağı da dahil etmeyi tercih etmişlerdir. Şebekeye bağlı bu dört elektroegirme cihazının özelliklerinin derlenmiş hali Tablo 2' de verilmektedir (Brako vd., 2018).

Tablo 2: Şebekeye Bağlı Çalışan Taşınabilir Elektroegirme Tabancaları ve Özellikleri.

Referans	Çalışma Voltajı	Çift Şırınga	Ağırlık	Patent
Edirisinghe ve ark.	0-13.5 kV	Var	1000 g	Yok
Long ve ark.	6-10 kV	Yok	-	Var (Patent Numarası: WO2015074454A1)
Ekren ve ark.	0-30 kV	Var	1750 g	Yok
Brako ve ark.	0-33 kV	Yok	-	Yok

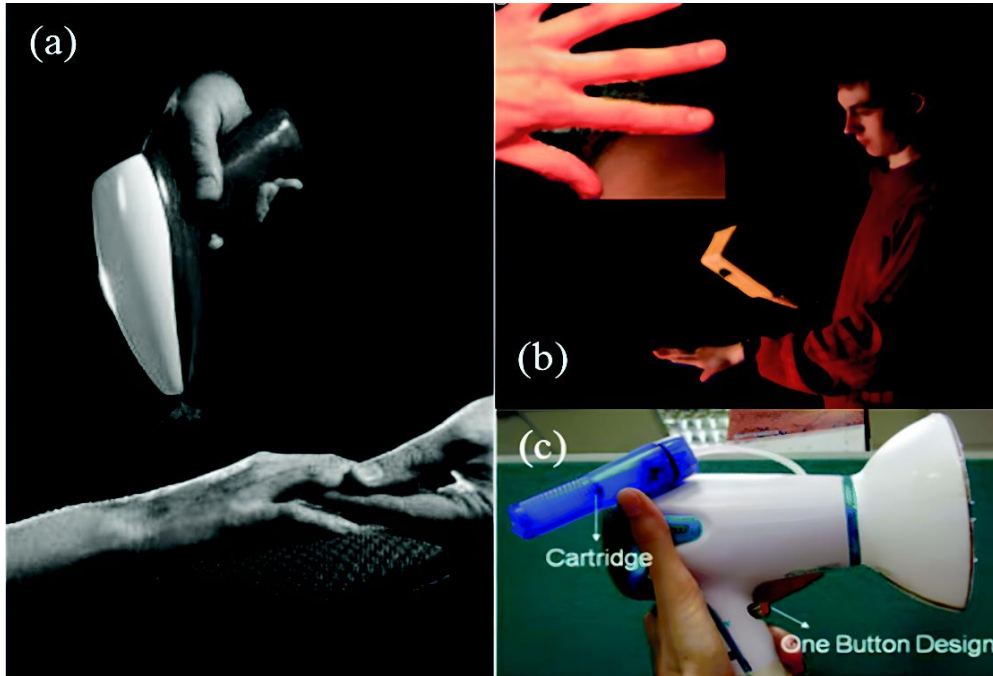
Makalenin başında iki kategoriye ayırdığımız taşınabilir elektroegirme cihazlarının, kendilerine özgü avantajlar ve dezavantajları bulunmaktadır. Tablo 3' te şebekeye bağlı yerinde elektroegirme cihazlarının avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

Tablo 3: Şebekeye Bağlı Çalışan Taşınabilir Elektroeğirme Tabancalarının Avantajları ve Dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, sürekli bir üretim kapasitesine sahiptir. Bu sayede, büyük miktarda nanofiber üretimi yapmak mümkündür.	<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, düzenli bakım gerektirir. Bakım işlemleri zaman alıcı ve pahalı olabilmektedir.
<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, otomatik olarak çalışır ve insan müdahalesi gerektirmez. Bu sayede, üretim sürecinde insan hatalarından kaynaklanabilecek sorunların önüne geçilmektedir.	<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, yüksek gerilim gerektirir. Bu nedenle, güvenlik önlemlerine uyulması gerekmektedir.
<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, enerji verimliliği yüksek olduğu için işletme maliyetleri düşüktür.	
<ul style="list-style-type: none">➤ Şebekeye bağlı elektroeğirme cihazları, işlem kontrolü için gerekli sensörleri ve yazılımı içermektedir. Bu sayede, işlem parametreleri kolayca ayarlanabilmekte ve izlenebilmektedir.	

Pille çalışan taşınabilir elektroeğirme cihazları

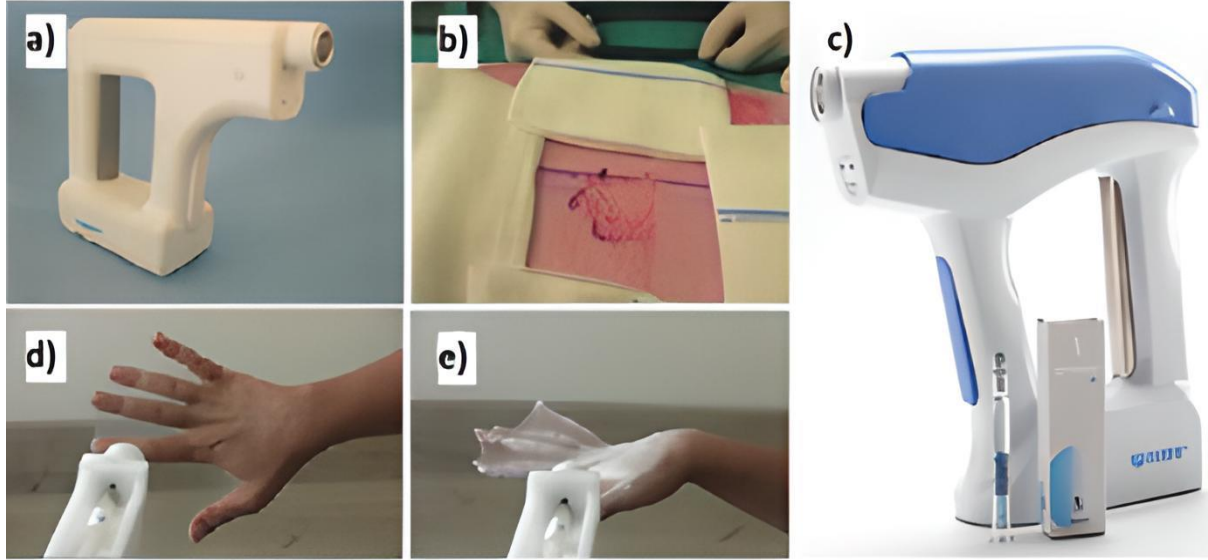
Şimdiye kadar tartışılan yerinde elektroeğirme cihazları, ağır bir güç kaynağına sahip ve şebekeye bağlı olmaları nedeniyle güç kaynağından ayrı bir şekilde elde tutulan düzeneklerden oluşturulmuştur. Bu nedenle bir dereceye kadar taşınabilirliğe sahiplerdir. Pille çalışan cihazların ortaya çıkmasına neden olan başlıca etken budur. Şebekeye bağlılığın oluşturduğu sınırlandırmayı ortadan kaldırmak için birkaç girişimde bulunulmuştur.



Şekil 7: Pille Çalışan Taşınabilir Elektroeğirme Aparatına Örnekler (Huang vd., 2003).

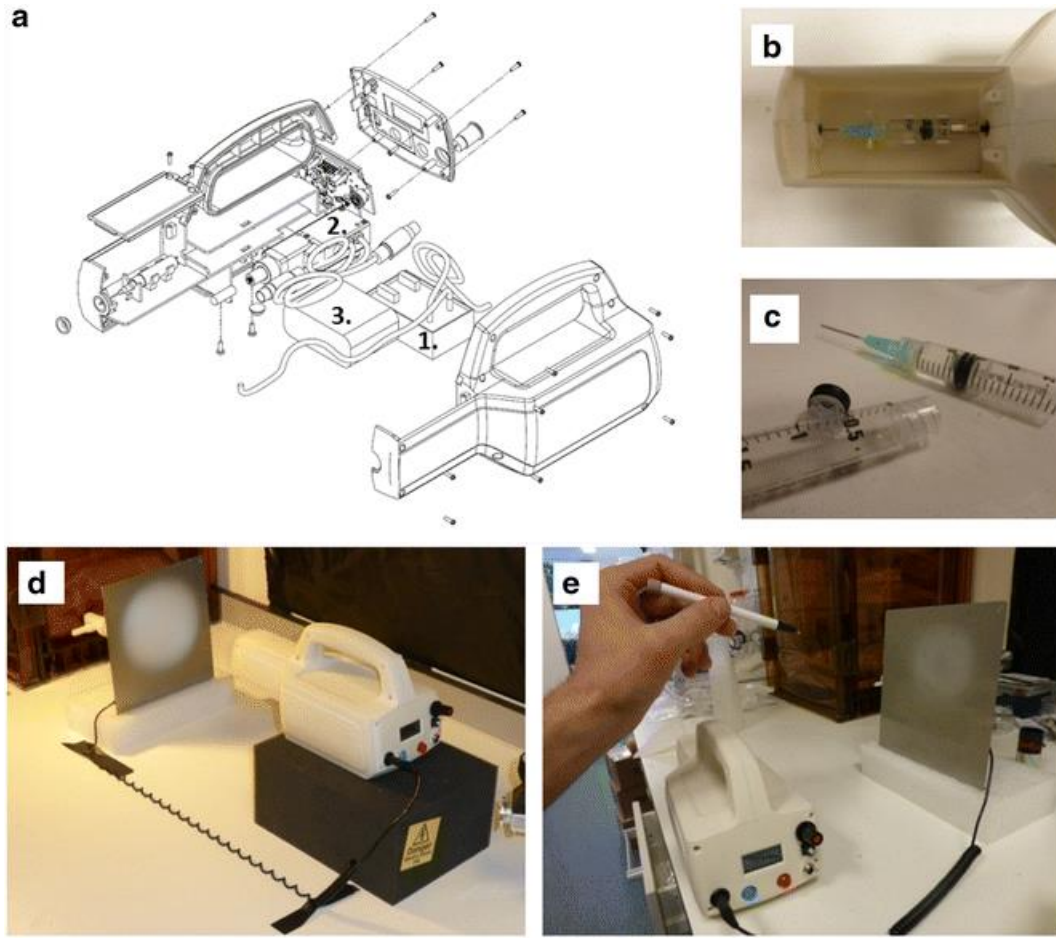
Şekil 7(a)' da gösterildiği gibi, Smith ve Reneker yara ve yanıkların üzerine, pille çalışması sayesinde yerinde pansuman oluşturmak için doğrudan biyolojik olarak parçalanabilen fiberler üreten taşınabilir bir elektroeğirme cihazı geliştirmişlerdir (Huang vd., 2003). Smith ve Reneker belli bir hazneye sahip pille çalışan cihaz önermiştir. Bu fiber ağının doğrudan etkilenen cilt bölgelerine elektroeğirildiği süreci açıklamışlardır (Smith vd., 2004). Ayrıca benzer şekilde Şekil 7(b)' de gösterildiği gibi Greiner ve Marburg Üniversitesi'nden araştırmacılar, nanofiberlerin

yaraların üzerine doğrudan yerleştirilmesi için kullanılabilir elde tutulan bir elektroğirme ekipmanı geliştirmişlerdir (Greiner & Wendorff, 2007). Bu şekilde çalışan bir cihazda, standart pillerle yüksek voltaj sağlanabileceği ve modüler bir yapı ile farklı polimer çözeltilerinden fiber üretmenin mümkün olduğu bildirilmiştir. Bu sayede istenilen bölgelere, yaranın ve bölgenin türüne bağlı olarak çeşitli polimer taşıyıcıların ve ilaçların uygulanabileceğini bildirmişlerdir. Şekil 7(c)'de gösterildiği gibi Singapur Üniversitesi tarafından da benzer prensibe dayanan bir cihaz daha önerilmiştir. Ancak, pille çalışan bu cihazlar hakkında çok az teknik ayrıntı ortaya konmuştur ve pratik uygulamalarla ilgili araştırmaları takip edilmektedir (Liu vd., 2010).



Şekil 8: (A) Nicast Ltd. Lod, İsrail Tarafından İmal Edilen Bir El Elektroğirme Cihazının Görüntüsü. (B) Bir Domuz Modelinde Yara Bölgesi Ve (C) Fiberler, Aynı Cihaz Kullanılarak Bir İnsan Eline Doğrudan Elektroğirme Ve (D) Fiberler, Aynı Cihaz Kullanılarak Bir İnsan Eline Doğrudan Elektroğirme. (Haik vd., 2017; Yan vd., 2019). (E) Satışta Bulunan Spincare Cihazının Güncel Tasarımı Ve İçerisinde Çözelti Bulunan Tek Kullanımlık Kapsül (Nanomedic's Spincare, 2023).

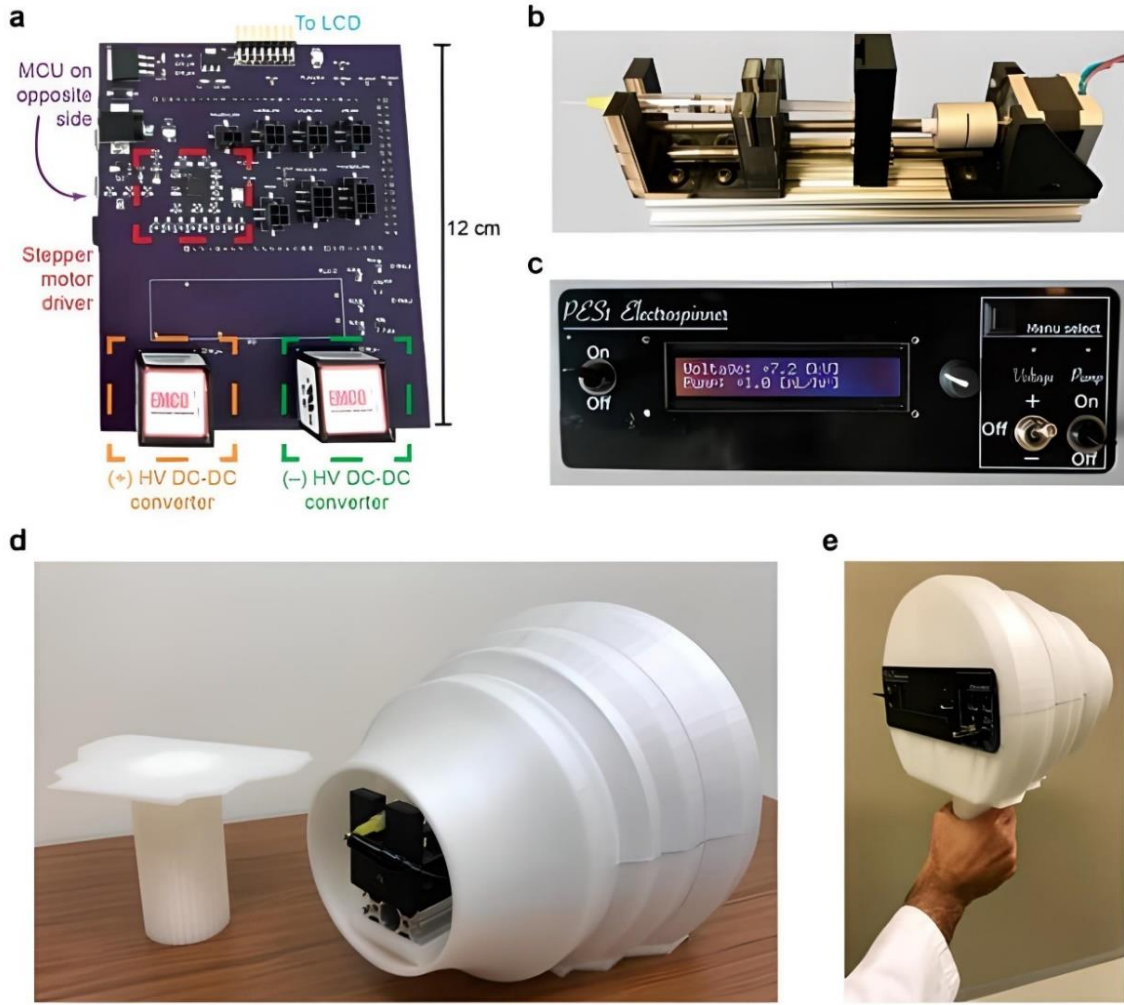
Şekil 8(a-c)'de görüldüğü gibi Josef Haik ve ark. yaraya doğrudan uygulanan yara örtülerinin üretimi için taşınabilir bir elektroğirme cihazının fizibilitesini incelemişlerdir (Haik vd., 2017). Nicast Ltd, Lod, İsrail tarafından üretilen yeni bir taşınabilir el cihazı Şekil 8(a)'da görülmektedir. Canlı deneyleri için biyouyumlu tıbbi sınıf polyeater, polikarbonat ve poliüretan polimerlerini doğrudan bir yara bölgesine elektroğirmemek için kullanılmış ve yara örtüsü oluşturulmuştur. Yara örtüsünün yapışması, yara eksüdası, eskar varlığı, ters deri reaksiyonu, yara kapanması, pansuman çıkarma kolaylığı ve tam iyileşme süresi açısından 2, 7 ve 14. günlerde değerlendirmeler yapılmıştır. Cilt reaksiyonu, yara kapanması, pansuman çıkarma kolaylığı ve tam iyileşme süresi incelenmiştir. Şekil 8(d-e)'de gösterildiği gibi arzu edilen ve uygulanabilir kalınlıkta bir pansumanın oluşturulması için sadece bir dakika yeterlidir. Elde taşınan cihazın, enfeksiyon ve çapraz kontaminasyon oranlarını azaltma potansiyeline sahip, yaradan belli bir mesafede uygulanan yerinde nanofiberli pansumanların üretilmesinde etkili ve kullanımının uygun olduğu iddia edilmiştir. Şekil 8(c)'de gösterilen şu an satışta olan bu cihaz, önceden doldurulmuş kapsüller içerisinde çözelti bulunan SpinKit™, SpinCare™ olarak yeniden adlandırmıştır (Josef Haik ve ark. Nanomedic™ firması Spincare™ cihazına patent almış ve aktif olarak satış yapmaktadır (Haik vd., 2017).



Şekil 9: Taşınabilir Elektroğirme Aparatının Tasarımı, (a) Cihazın CAD Çizim Düzenine Patlatılmış Görünümü (1. Yüksek Gerilim Konvertörü, 2. Lineer Aktüatör, 3. Pil Paketi), (b) Kartuşlar için Ayrı Bölme, Şu Adresten Erişilebilir: Çıkarılabilir Kapak, (c) Bu Çalışmada Kullanılan Kartuşlar. (d) Fiberler Doğrudan Cihazdan Eğiriliyor, (e) Cihaza Bağlı Bir Kalem Uzantısı Aracılığıyla Manuel Olarak Elektrikle Eğirilen Fiberler (Mouthuy vd., 2015).

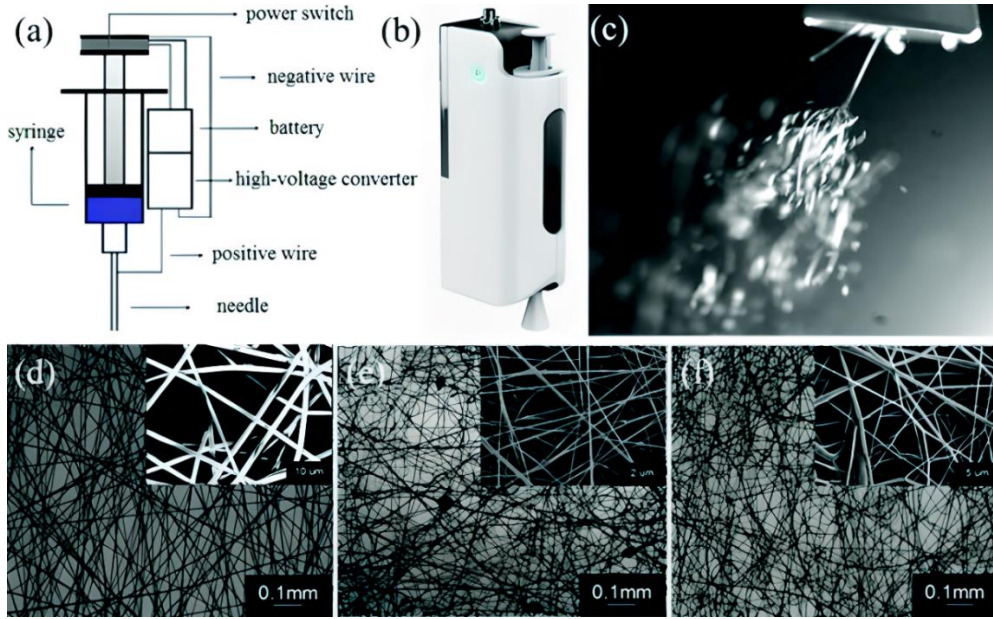
Ye ve ark. mikrodenetleyici aracılığıyla voltajın ve akış hızının kontrol edilebildiği, çoğu elektroğirme ve elektrosprey uygulaması için uygun bir değer aralığında ayarlanıp çalışabilen yeni bir taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmiştir. Manuel eğirme için bir kalem uzantısına sahiptir. Şekil 9(a)' da görüldüğü gibi elektroğirme cihazının boyutunu en aza indirmek için yüksek voltaj dönüştürücü, lineer aktüatör ve pillerden oluşan muhafaza içinde paketlenmiştir. Cihazın toplam ağırlığı 1,11 kg'dır (Chui vd., 2018; Mouthuy vd., 2015).

Polimer bulunduğu kartuşlar Şekil 9(a-b)' de gösterildiği gibi, güvenli ve kolay değiştirilebilmeleri için ayrı bir bölmeye yerleştirilmiştir. Kartuş olarak kullanılan değiştirilmiş şırıngalar, Şekil 9(c)' de görülmektedir. Elektroğirme, Şekil 9(d-e)' de gösterildiği gibi doğrudan kartuştan veya kalem uzantısıyla döndürülerek yapılmıştır. Voltajlar 0 ile 14 kV arasında seçilebilir ve 0 ile 10 ml/h arasında çok çeşitli akış hızları önceden ayarlanmıştır. Ye ve ark. elektroğirme işlemi sırasında değerleri LCD ekranda görülebilecek şekilde tasarlamışlardır. Piller, cihazın 13 kV ve 1 ml/h' de yaklaşık 105 dakika çalışması için yeterli gücü sağlayabilmiştir. Fiberler hem domuz hem de insan derileri üzerinde başarılı bir şekilde elektroğirilenmiştir. Özellikle kalem uzatma cihazı kullanılarak, fiberler bir maske kullanılarak belirgin bir alana hassas bir şekilde bırakılabilmıştır. Elektroğirme süresi, toplama alanını kolayca gözlemlenebilir hale getirmek için seçilmiştir. Ancak birkaç dakikalık elektroğirme işlemi birkaç kat fiber biriktirmek için yeterlidir. Ye ve ark. geliştirdikleri bu cihazda poli p-dioksanon (PDO), poli 3-hidroksibutirat (PHB), polivinil alkol (PVA), polietilen oksit (PEO) ve polivinil bütiral (PVB) gibi diğer bazı polimerler sorunsuz bir şekilde elektroğirmiştir (Chui vd., 2018; Mouthuy vd., 2015).



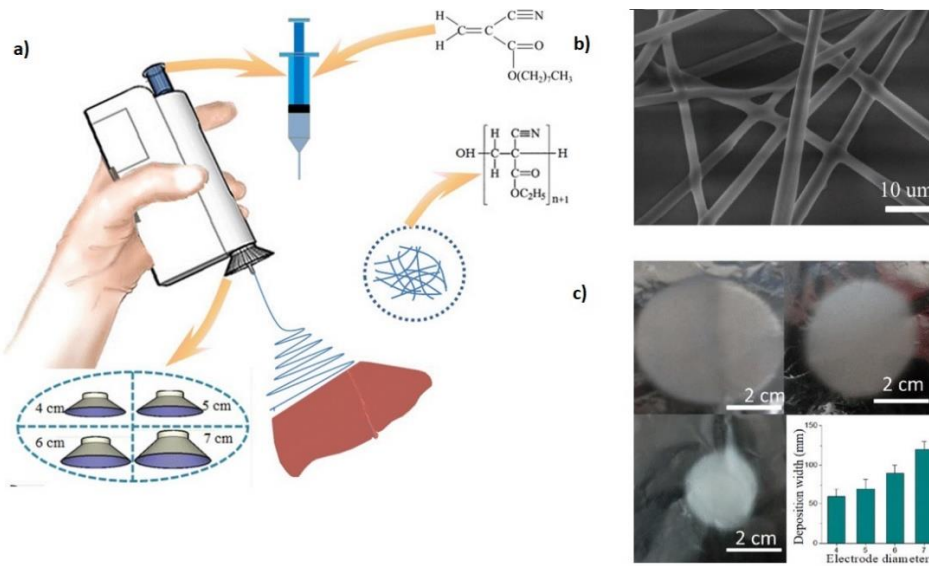
Şekil 10: Taşınabilir Elektroğirme Cihazı. (a) İki DC-DC Yüksek Voltaj Dönüştürücü Ana PCB: Pozitif (Sol) ve Negatif (Sağ). (b) Kademeli Motorla Çalıştırılan Şırınga Pompası. (c) Ön Panel Kullanıcı Arabirimi. (d) Sapın Ayrılmış ve (e) Sapın Takılı Olduğu, Tamamen İnşa Edilmiş Elektroğirme Cihazı (Revia vd., 2019).

Şekil 10'deki gösterildiği gibi Zhang ve ark. kozmetik olarak saç kalınlaştırma tedavileri için doğrudan cilde fiber üretimi için taşınabilir elektroğirme cihazı geliştirmişlerdir. 3D baskı ile muhafaza içine yerleştirilen bu elektroğirme cihazı 1,5 kg ağırlığında ve 250 mm × 265 mm × 225 mm boyutlarındadır. Cihaz, dört adet 9 V pil ile çalıştırılabilirdiği gibi 24 V, 2.5A AC/DC adaptörü ile de çalıştırılabilmektedir. Bu cihazın yüksek gerilim kaynağı 1 ila 10 kV arasındadır. 24 V adaptörden veya pillerden gelen güç, 12 V ve 5 V değerinde iki voltaj regülatörünü çalıştırmak için kullanılmıştır. Şekil 10(a)'da ana baskı devresi (PCB), büyük bileşenler ve bağlantılar gösterilmiştir. Şekil 10(c)'de yer alan ATmega2560 MCU, elde tutulan elektroğirme cihazının ön panelindeki döner kodlayıcı ve anahtarlarla etkileşime girerek Şekil 10(b)'deki şırınga pompasının akış hızını ve yüksek voltaj kaynaklarının büyüklüğünü ve polaritesini kontrol etme imkânı sağlamaktadır. Bu işlev, yüklenen yazılım sayesinde gerçekleştirilir ve kullanıcının elektroğirme cihazının kontrolünü kolaylaştırmaktadır. Cihazda güç kaynakları doğrultusunda ve PCB'den önce aşırı akım koruması için 2 mA sigorta kullanılmıştır. Şırınga pompa, bir adım motoru tarafından çalıştırılır ve 3D baskılı bir muhafazaya yerleştirilmiştir. Şekil 10(d-e) sapı bağlı ve bağlı olmayan elde taşınabilen elektroğirme cihazının fotoğraflarını göstermektedir (Revia vd., 2019).



Şekil 11: (a) Pille Çalışan Portatif El Elektroğirme Aparatının Şematik Diyagramı, (b) Çin'de Ticari Olarak Bulunan Cihazın Görüntüsü. (c) Yüksek Hızlı Bir Kamera Tarafından Yakalanan Cihazdan Elektroğirme Jetleri Ve Sonuçta Elde Edilen Elektroğirme Fiber Morfolojileri: (d) PVP, (e) PVDF ve (f) PCL (Xu vd., 2015).

Long ve ark. Şekil 11' de gösterildiği gibi şırınga, pille çalışan basit ve kolay taşınabilir bir elde taşınabilir elektroğirme cihazı tasarlamışlardır. Herhangi bir pompa veya motor olmadan el kuvvetiyle itilen bu şırınga manuel olarak çalışmaktadır. Bu cihazdaki yüksek voltaj kaynağı pillere ve bir yüksek voltaj dönüştürücüye dayanmaktadır. Dönüştürücünün pozitif elektrotu şırınganın üzerindeki iğneye, negatif elektrot ise cihazı çalıştırmak için kullanılacak iletken bir metal folyoya bağlanmıştır. Yük birikimini önlemek için metal folyoya dokunarak yükün vücut (el) yoluyla aktarılacağı bildirilmiştir. Cihazın pratik uygulaması için, iki adet 3 V AAA pil, 10 kV'a kadar yüksek voltaj sağlamıştır. Long ve ark. geliştirdiği bu taşınabilir elektroğirme cihazı ihmal edilebilir bir akım ve optimum çalışma mesafesiyle (2 ila 10 cm) 15 saatten fazla süreli çalışma potansiyeline sahiptir. Cihazın hem yüksek gerilim kaynağı hem de pompa olmaksızın çalışması hafif ve küçük olmasını sağlamıştır. Ağırlığı yaklaşık 120 g, boyutu 5 cm uzunluktadır. Şekil 11(c-f)' de cihazın polimer elektroğirme performansı da incelenmiş ve polivinilpirolidon (PVP), poliviniliden florür (PVDF) ve polikaprolakton (PCL) dâhil olmak üzere çeşitli polimerler başarıyla fiber haline getirilmiştir (Xu vd., 2015).



Şekil 12: (a) Karaciğer Rezeksiyonu Hemostazı İçin Üretilen Elektrik Alanıyla Modifiye Edilmiş NOCA Fiberlerinin Şematik Diyagramı, (b) Metalik Koni Çapının Bir Fonksiyonu Olarak Biriktirme Alanının Boyutu, (c) NOCA Tıbbi Yapışkan Bazlı Fiberler Hemostaz İçin Bu Elektrik Alanı Destekli Elektroğirme Cihazı Kullanılarak Karaciğer Dokusunun Yüzeyine Biriktirilir (Dong vd., 2016; Luo vd., 2018).

Long ve arkadaşları, Şekil 12' de gösterildiği gibi karaciğer hemostazı için NOCA (N-oktil-2-siyanoakrilat) tıbbi yapıştırıcının elektroerme yöntemiyle doğrudan elektroerilenmesi amacıyla pille çalışan bir elektroerme cihazı tasarlamışlardır. Bu özel uygulama, ameliyattan sonra doku yapışmasını kontrol etmek için oldukça önemlidir. Şekil 12(b)' de gösterildiği gibi cihaz, metal koni ile birlikte kullanılarak fiber birikim aralığının ayarlanabileceği şekilde değiştirilmiştir. Bu değişiklik, fiberlerin fare karaciğerinin rezeksiyon sahasına yerleştirilmesiyle hızlı hemostaz sağlamış ve doku adezyonunda azalmaya neden olmuştur. Ancak, Şekil 12(c)' de görüldüğü gibi voltaj sabitlendiği için fiberlerin fiziksel özellikleri ve boyutları değiştirilememiş, tutarsız fiber birikimi sorunuyla karşılaşmıştır. Bu cihazın taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı, acil tıbbi prosedürler, hasta bakımı veya evde bakım durumları için geliştirilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Ancak, cihazın tasarımındaki sınırlamaların giderilmesi gerekmektedir. Örneğin, voltajın değiştirilebilir hale getirilmesi ve fiber birikiminin daha tutarlı olmasını sağlamak için cihazın tasarımı optimize edilmelidir (Dong vd., 2016; Luo vd., 2018). Pille çalışan elektroerme cihazı olarak bu zamana kadar literatüre giren çalışmalar ve özellikleri Tablo 4' de ana hatları ile verilmektedir.

Tablo 4: Pille Çalışan Taşınabilir Elektroerme Tabancaları ve Özellikleri

Referans	Çalışma Voltajı	Çift Şırınga	Ağırlık	Patent
Smith ve Reneker	0-13.5 kV	Var	-	Yok
Haik ve ark.	0-30 kV	Yok	-	Var (Patent numarası: US10639203B2)
Ye ve ark.	0-30 kV	Var	1110 g	Yok
Zhang ve ark.	0-10 kV	Yok	1500 g	Yok
Long ve ark.	0-10 kV	Yok	120 g	Var (Patent numarası: CN201210229010)

Tablo 5'te pille çalışan taşınabilir elektroerme cihazlarının avantaj ve dezavantajları verilmektedir.

Tablo 5: Pille Çalışan Taşınabilir Elektroerme Cihazlarının Avantaj ve Dezavantajları.

Avantajlar	Dezavantajlar
<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha fazla hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Bu sayede, farklı yerlerde kullanılabilirlerdir.	<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha düşük üretim kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, büyük ölçekli üretimler için uygun değildir.
<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha fazla hareket kabiliyeti sağlamaktadır. Bu sayede, farklı yerlerde kullanılabilirlerdir.	<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, pil ömrü ile sınırlıdır. Bu nedenle, uzun süreli kullanımlar için uygun değildir.
<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, küçük boyutlu ve hafiftir. Bu nedenle, kolayca taşınabilirlerdir.	<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, düzenli pil değiştirme maliyetleri gerektirir. Bu nedenle, işletme maliyetleri artabilmektedir.
<ul style="list-style-type: none">Pille çalışan elektroerme cihazları, şebekeye bağlı cihazlara göre daha düşük yatırım maliyetlerine sahiptir. Bu nedenle, küçük ölçekli üretimler için uygun olabilmektedirler.	

SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektroerme teknolojisi, günümüzde nanofiber üretimi için oldukça yaygın bir yöntemdir. Ancak, çoğu tezgah üstü elektroerme cihazı büyük ve ağırdır, bu nedenle taşınabilir elektroerme cihazlarına olan ihtiyaç artmaktadır. Bu makalede, bu zamana kadar geliştirilen taşınabilir elektroerme cihazları, çalışma prensipleri ve mekanizmaları hakkında bilgi vermektedir.

Esasen biyomedikal uygulamalarda kullanılmak üzere tasarlanan taşınabilir elektroerme cihazları, biyolojik olarak uyumlu polimerler kullanılarak yara bakımı ve onarımı, doku üretimi, ilaç salınımı ve antibakteriyel kaplamaların

oluşturulması vb. birçok uygulama alanı sahiptir. Elektronik cihazların üretiminde kullanılacak malzeme ve kaplamaların oluşturulması, tekstil alanında mikrofiber materyallerin üretimi veya fotovoltaiik panellerin üzerine verim artırıcı kaplamalar yapılması bu alanlara örnek olarak verilebilmektedir. Taşınabilir elektroçirme cihazları, yüksek üretkenlikleri, düşük maliyetleri ve kolay kullanımları nedeniyle bu uygulama alanlarında büyük bir potansiyele sahiptir.

Taşınabilir elektroçirme cihazlarının çalışma prensibi, geleneksel elektroçirme cihazlarına benzerdir. Ancak, bu cihazlar küçük ve hafif olduğundan, kullanımı daha kolaydır. Taşınabilir elektroçirme cihazları, yüksek gerilim kaynağı, pompa ve iğne ucu gibi temel parçalardan oluşur. Elektroçirme işlemi, polimer çözeltilsinin iğne ucuyla alınması ve yüksek gerilimle yüklü bir hedef yüzey üzerine farklı şekillerde püskürtülmesiyle gerçekleştirilir.

Sonuç olarak, taşınabilir elektroçirme cihazları, nanofiberlerin üretimi için yaygın bir yöntem olan elektroçirme teknolojisinde önemli bir gelişmedir. Bu cihazlar, biyomedikal, elektronik, tekstil, enerji ve çevre gibi birçok alanda kullanılabilirler. Elektroçirme cihazı, güç elektroniğindeki ilerlemelere bağlı olarak geliştirilmektedir. Yüksek üretkenlikleri, düşük maliyetleri ve kolay kullanımları sayesinde taşınabilir elektroçirme cihazları, gelecekte daha da yaygınlaşacak ve birçok farklı uygulama alanında kullanılmaya devam edecektir.

KAYNAKLAR

- Acar, G. Ö. (2007). Doku Mühendisliği ve Hücre Kültürü Kaynaklı Yeni Tedavi Seçenekleri. *Cerrahpaşa Tıp Dergisi*, 38(1), 32-39.
- Alharbi, A. R., Alarifi, I. M., Khan, W. S., & Asmatulu, R. (2016). Highly hydrophilic electrospun polyacrylonitrile/polyvinylpyrrolidone nanofibers incorporated with gentamicin as filter medium for dam water and wastewater treatment. *Journal of Membrane and Separation Technology*, 5(2), 38-56.
- Asmatulu, R., & Khan, W. S. (2018). *Synthesis and applications of electrospun nanofibers*. Elsevier.
- Bhushani, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2014). Electrospinning and electrospraying techniques: Potential food based applications. *Trends in Food Science & Technology*, 38(1), 21-33.
- Brako, F., Luo, C., Craig, D. Q., & Edirisinghe, M. (2018). An Inexpensive, Portable Device for Point-of-Need Generation of Silver-Nanoparticle Doped Cellulose Acetate Nanofibers for Advanced Wound Dressing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(5), 1700586.
- Chen, J.-P., Chang, G.-Y., & Chen, J.-K. (2008). Electrospun collagen/chitosan nanofibrous membrane as wound dressing. *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*, 313, 183-188.
- Chui, C.-Y., Mouthuy, P.-A., & Ye, H. (2018). Direct electrospinning of poly (vinyl butyral) onto human dermal fibroblasts using a portable device. *Biotechnology letters*, 40, 737-744.
- Deng, X.-L., Sui, G., Zhao, M.-L., Chen, G.-Q., & Yang, X.-P. (2007). Poly (L-lactic acid)/hydroxyapatite hybrid nanofibrous scaffolds prepared by electrospinning. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 18(1), 117-130.
- Dong, R.-H., Jia, Y.-X., Qin, C.-C., Zhan, L., Yan, X., Cui, L., Zhou, Y., Jiang, X., & Long, Y.-Z. (2016). In situ deposition of a personalized nanofibrous dressing via a handy electrospinning device for skin wound care. *Nanoscale*, 8(6), 3482-3488.
- Dong, R., Qin, C., Qiu, X., Yan, X., Yu, M., Cui, L., Zhou, Y., Zhang, H., Jiang, X., & Long, Y. (2015). In situ precision electrospinning as an effective delivery technique for cyanoacrylate medical glue with high efficiency and low toxicity. *Nanoscale*, 7(46), 19468-19475.
- Dong, W.-H., Liu, J.-X., Mou, X.-J., Liu, G.-S., Huang, X.-W., Yan, X., Ning, X., Russell, S. J., & Long, Y.-Z. (2020). Performance of polyvinyl pyrrolidone-isatis root antibacterial wound dressings produced in situ by handheld electrospinner. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188, 110766.
- Durmuş, F., Ekren, M., & Gürol, Ö. (2017). Elektro-çirme Yöntemiyle ÇCKNT Takviye Edilerek Güçlendirilmiş Naylon-6, 6 Nanoelyafların Üretimi ve Karakterizasyonu. *El-Cezeri*, 4(2), 146-155.
- Ekren, N., & Karacan, C. E. (2022). Manufacturing Of A Portable Electrospinning Gun For Biomedical Applications. *Revista Romana de Materiale*, 52(3), 213-219.

- Esentürk, İ., Erdal, M. S., & Güngör, S. (2016). Electrospinning method to produce drug-loaded nanofibers for topical/transdermal drug delivery applications. *Journal of Faculty of Pharmacy of Istanbul University*, 46(1), 49-69.
- Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2007). Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30), 5670-5703.
- Haik, J., Kornhaber, R., Blal, B., & Harats, M. (2017). The feasibility of a handheld electrospinning device for the application of nanofibrous wound dressings. *Advances in wound care*, 6(5), 166-174.
- Huang, C., Chen, S., Lai, C., Reneker, D. H., Qiu, H., Ye, Y., & Hou, H. (2006). Electrospun polymer nanofibres with small diameters. *Nanotechnology*, 17(6), 1558.
- Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M., & Ramakrishna, S. (2003). A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites science and technology*, 63(15), 2223-2253.
- Jiang, K., Long, Y.-Z., Chen, Z.-J., Liu, S.-L., Huang, Y.-Y., Jiang, X., & Huang, Z.-Q. (2014). Airflow-directed in situ electrospinning of a medical glue of cyanoacrylate for rapid hemostasis in liver resection. *Nanoscale*, 6(14), 7792-7798.
- Karacan, C. E. (2019). *Biyomedikal Uygulamaları İçin Taşınabilir Elektroğirme Sprey Tabancasının Tasarımı, Üretimi Ve Performansı* Marmara Üniversitesi (Turkey)].
- Kim, T. G., Lee, D. S., & Park, T. G. (2007). Controlled protein release from electrospun biodegradable fiber mesh composed of poly (ϵ -caprolactone) and poly (ethylene oxide). *International journal of pharmaceuticals*, 338(1-2), 276-283.
- Lau, W. K., Sofokleous, P., Day, R., Stride, E., & Edirisinghe, M. (2014). A portable device for in situ deposition of bioproducts. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 3(2), 94-105.
- Liu, G.-S., Yan, X., Yan, F.-F., Chen, F.-X., Hao, L.-Y., Chen, S.-J., Lou, T., Ning, X., & Long, Y.-Z. (2018). In situ electrospinning iodine-based fibrous meshes for antibacterial wound dressing. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 1-7.
- Liu, X.-F., Zhang, J., Liu, J.-J., Zhou, Q.-H., Liu, Z., Hu, P.-Y., Yuan, Z., Ramakrishna, S., Yang, D.-P., & Long, Y.-Z. (2020). Bifunctional CuS composite nanofibers via in situ electrospinning for outdoor rapid hemostasis and simultaneous ablating superbug. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126096.
- Liu, Y., Ramaseshan, R., Dong, Y., Kumar, A., & Ramakrishna, S. (2010). A portable electrospinning apparatus. *WO Patent App PCT/SG2008/000,444*.
- Long, Y.-Z., Zhang, J., Liu, Z., Wang, B.-C., Yu, M., & Ramakrishna, S. (2022). Application of Hand-Held Electrospinning Devices in Medicine. *Electrospun Nanofibers: Principles, Technology and Novel Applications*, 605-630.
- Luo, W.-L., Zhang, J., Qiu, X., Chen, L.-J., Fu, J., Hu, P.-Y., Li, X., Hu, R.-J., & Long, Y.-Z. (2018). Electric-field-modified in situ precise deposition of electrospun medical glue fibers on the liver for rapid hemostasis. *Nanoscale Research Letters*, 13(1), 1-8.
- Ma, Z., Kotaki, M., Yong, T., He, W., & Ramakrishna, S. (2005). Surface engineering of electrospun polyethylene terephthalate (PET) nanofibers towards development of a new material for blood vessel engineering. *Biomaterials*, 26(15), 2527-2536.
- Maretschek, S., Greiner, A., & Kissel, T. (2008). Electrospun biodegradable nanofiber nonwovens for controlled release of proteins. *Journal of Controlled Release*, 127(2), 180-187.
- Mouthuy, P.-A., Groszkowski, L., & Ye, H. (2015). Performances of a portable electrospinning apparatus. *Biotechnology letters*, 37, 1107-1116.
- Nanomedic's Spincare*. (2023). Retrieved 10.05.2023 from <https://nanomedic.com/>
- Reneker, D. H., & Yarin, A. L. (2008). Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*, 49(10), 2387-2425.
- Revia, R. A., Wagner, B. A., & Zhang, M. (2019). A portable electrospinner for nanofiber synthesis and its application for cosmetic treatment of alopecia. *Nanomaterials*, 9(9), 1317.

- SalehHudin, H. S., Mohamad, E. N., Mahadi, W. N. L., & Muhammad Afifi, A. (2018). Multiple-jet electrospinning methods for nanofiber processing: A review. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(5), 479-498.
- Santangelo, S. (2019). Electrospun nanomaterials for energy applications: Recent advances. *Applied Sciences*, 9(6), 1049.
- Smith, D. J., Reneker, D. H., McManus, A. T., Schreuder-Gibson, H. L., Mello, C., & Sennett, M. S. (2004). Electrospun fibers and an apparatus therefor.
- Sofokleous, P., Stride, E., Bonfield, W., & Edirisinghe, M. (2013). Design, construction and performance of a portable handheld electrohydrodynamic multi-needle spray gun for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(1), 213-223.
- Suepueren, G., KANAT, Z. E., Ahmet, Ç., Kirci, T., Gueluemser, T., & TARAKÇIOĞLU, I. (2007). Nano fibres (Part 2). *Textile and Apparel*, 83-89.
- Şimşek, M. (2018). Elektroeğirme Yöntemi ile Fibröz Doku İskelelerinin Üretimi. *Natural and Applied Sciences Journal*, 1(1), 31-34.
- Teo, W.-E., Inai, R., & Ramakrishna, S. (2011). Technological advances in electrospinning of nanofibers. *Science and technology of advanced materials*.
- Williams, G. R., Raimi-Abraham, B. T., & Luo, C. (2018). *Nanofibres in drug delivery*. UCL Press.
- Xu, S.-C., Qin, C.-C., Yu, M., Dong, R.-H., Yan, X., Zhao, H., Han, W.-P., Zhang, H.-D., & Long, Y.-Z. (2015). A battery-operated portable handheld electrospinning apparatus. *Nanoscale*, 7(29), 12351-12355.
- Yan, X., Yu, M., Ramakrishna, S., Russell, S. J., & Long, Y.-Z. (2019). Advances in portable electrospinning devices for in situ delivery of personalized wound care. *Nanoscale*, 11(41), 19166-19178.
- Yan, X., Yu, M., Zhang, L.-H., Jia, X.-S., Li, J.-T., Duan, X.-P., Qin, C.-C., Dong, R.-H., & Long, Y.-Z. (2016). A portable electrospinning apparatus based on a small solar cell and a hand generator: design, performance and application. *Nanoscale*, 8(1), 209-213.
- Zhang, J., Zhao, Y.-T., Hu, P.-Y., Liu, J.-J., Liu, X.-F., Hu, M., Cui, Z., Wang, N., Niu, Z., & Xiang, H.-F. (2020). Laparoscopic electrospinning for in situ hemostasis in minimally invasive operation. *Chemical Engineering Journal*, 395, 125089.
- Zhou, T., Wang, Y., Lei, F., & Yu, J. (2020). In-situ electrospinning for intestinal hemostasis. *International Journal of Nanomedicine*, 3869-3875.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.09.2023
Kabul Tarihi : 17.10.2023

Received Date : 06.09.2023
Accepted Date : 17.10.2023

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİNİN DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI ÜZERİNE BİR DERLEME

A REVIEW ON THE USE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY IN THE RAILWAY INDUSTRY

İbrahim ASLAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-9157-9286)
Ahmet CAN² (ORCID: 0000-0002-1231-7369)

¹ Amasya Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye
² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İbrahim ASLAN, ibrahim.aslan@amasya.edu.tr

ÖZET

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine göre nesnelerin katman katman üretildiği yenilikçi bir yöntemdir. Son yıllarda eklemeli imalatın kullanım alanları hızla artmaktadır. Bu imalat yönteminin birçok sektörde olduğu gibi demiryolu sektöründe de kullanım potansiyeli yüksektir. Demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın genel olarak; demiryolu altyapısında ve demiryolu üstyapısında, demiryolu araçlarında kullanıldığı görülmektedir. Eklemeli imalatın özellikle parçaların özelleştirilmesine olanak tanınması, karmaşık parçaların üretimi ve tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, malzeme tasarrufu, düşük üretim maliyeti gibi avantajları, demiryolu endüstrisinde ve diğer endüstrilerde kullanımının yaygınlaşmasına olanak sağlamaktadır. Eklemeli imalatın malzeme sınırlamaları ve üretim hızı gibi bazı sınırlamaları olsa da, bu avantajların sunduğu imkanlar birçok alanda yeniliği teşvik etmektedir. Bu çalışmayla, demiryolu endüstrisi ve eklemeli imalat hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde kullanımı ve kullanıldığı alanlar hakkında inceleme yapılmıştır. Çalışma sonucunda, araştırmacılar için eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde hangi alanlarda kullanıldığı, hangi alanlarda ise kullanımının eksik olduğunun görülmesi ile kullanım alanının geliştirilmesi sağlanmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu endüstrisi, eklemeli imalat, raylı sistemler

ABSTRACT

Additive manufacturing is an innovative method where objects are produced layer by layer, unlike traditional production methods. In recent years, the applications of additive manufacturing have been rapidly expanding. The potential for using this manufacturing method is high not only in various sectors but also in the railway industry, just like many others. In the railway industry, additive manufacturing is commonly observed to be utilized in both railway infrastructure and superstructure, as well as in railway vehicles. The advantages of additive manufacturing, such as enabling customization of parts, production of complex components, design freedom, rapid prototyping, material savings, and low production costs, contribute to its widespread adoption not only in the railway industry but also in various other sectors. Despite certain limitations such as material restrictions and production speed, the opportunities presented by these advantages encourage innovation in numerous fields. This study provides general insights into the railway industry and additive manufacturing. Furthermore, it investigates the utilization of additive manufacturing in the railway industry and its various applications. As a result of this study, it aims to identify areas where additive manufacturing is already being employed within the railway industry and where it might be underutilized. This can help researchers work towards enhancing its application areas in the railway industry.

Keywords: Railway industry, additive manufacturing, rail systems

GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte demiryolu ulaşım sektörünün kullanım alanı artmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle aynı zamanda imalat sektöründe de önemli adımlar atılmaktadır. Eklemeli imalat da bu alanlarından birisidir. Demiryolu sektöründe lokomotif, vagon, altyapı ve üstyapı gibi bölümlerin oluşmasında geleneksel ve modern imalat yöntemlerinin önemi büyüktür. Modern imalat yöntemlerinden olan eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde kullanım alanlarının incelenmesi ve demiryollarında eklemeli imalat ile üretim imkânı olan alanların ortaya çıkması önem kazanmaktadır.

Demiryolları, şehirlerin ayrılmaz bir parçasıdır ve kentsel erişilebilirliği iyileştirmek ve şehirleri birbirine bağlamak için önemli etkileri vardır. Raylar üzerinde işleyen ve sadece belirli noktalarda duran raylı sistem, bu yönüyle diğer ulaşım türlerinden farklı olarak şehirlerle bağlantıların duraklar vasıtasıyla yapılması noktasındadır. Kent içi toplu taşımacılıkta, “demiryolu” yerine “raylı sistem” terimi kullanılır. Genellikle tercih edilen raylı taşımacılık tipleri; metro, hafif raylı sistem, teleferik, tramvay, füniküler, banliyö treni olarak listelenebilir (Ayyıldız & Eyigün, 2020).

Nüfusun, iş gücünün ve dolaşımdaki araç sayısının hızla artmasıyla trafik sorunlarının hızla arttığı günümüz kentlerinde, ekonomik ve verimli bir ulaşım sistemi kurmanın en temel şartı, diğer ulaşım sistemleriyle entegre bir demiryolu ağı kurmaktır. Raylı sistemin ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da insanların ekonomik ve sağlıklı seyahat etmesi yönünden avantajlıdır. İşletme maliyetlerini de dikkate alınırsa uzun vadede raylı sistem daha ekonomik olacaktır (Gündüz vd., 2011). Raylı sistemleri oluşturan bileşenlerin geleneksel ve modern imalat yöntemleriyle üretimi söz konusudur. Ancak son yıllarda eklemeli imalat gibi modern yöntemlerle üretiminin önem kazandığı görülmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi, “katmanlı imalat” veya “3B yazıcı teknolojisi” olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, dijital 3B verileri nesnelere dönüştüren bir teknolojiyi içermektedir. Bu yöntemin temeli, parçaları katman katman elde etmeye dayanmaktadır. Konvansiyonel yöntemlere göre karmaşık şekillere sahip parça üretme ve atık malzeme tasarrufu gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu yöntemle üretilen parçalar genellikle düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek darbe direnci gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Birçok endüstri için önemli olan tasarım esnekliği de bu yöntemin bir avantajıdır (Bozkurt vd., 2021).

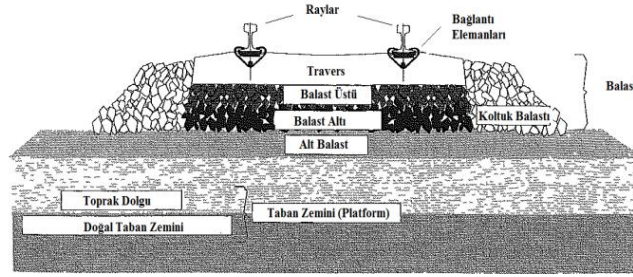
Eklemeli imalatın ortaya çıkışı, parça imalatında önemli bir gelişme ortaya koymuştur. Bu teknoloji, geliştirilmiş tasarımlara ve bileşenlerin hızlı üretimine olanak sağlamıştır. Özellikle karmaşık şekilli parçaların imalatını ve onarımını kolaylaştırmıştır. Eklemeli imalat teknolojisi ağırlıklı olarak havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma ve enerji sektörleri gibi büyük sanayi sektörlerine parça üretmek için kullanılmaktadır (Özsolak, 2019). Bu alanlara ek olarak, tıp, mimari, inşaat, uzay, eğitim, döküm, kuyumculuk, moda, raylı sistemler, tekstil gibi alanlarda da günümüzde bu teknoloji kullanılmaktadır.

Demiryollarının diğer ulaştırma türleri arasındaki avantajları ve eklemeli imalat teknolojisinin diğer imalat yöntemlerine göre faydaları göz önüne alındığında, demiryollarında eklemeli imalat teknolojisinin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Genel olarak demiryollarının altyapı, üstyapı elemanları, tren ve vagon parçaları gibi çeşitli kısımlarını oluşturan parçaların tasarım ve üretim alanında kullanımı önem kazanmaktadır.

DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİ

Endüstriyelleşme sürecinde üretimin kitleleşmesi sonucu ulaştırma türü olarak ortaya çıkan demiryolları, kömür, çelik ve diğer malların daha ucuz, daha hızlı ve daha düzenli olarak taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek hızlı trenlerin gelişmesi ve yaygınlaşması, özellikle şehirlerarası orta mesafeli seyahatlerde demiryolunu, karayollarına ve hava yoluna tercih edilen bir alternatif haline getirmiştir (Kabasakal & Solak, 2009). Ayrıca, hızlı trenlerin gelişmesi demiryolu taşımacılığına olan talebi artırmıştır. Demiryolu taşımacılığı günümüzde en önemli ulaşım araçlarından biri haline gelmiştir Demiryolu taşımacılığının kalitesi ise doğrudan güvenlikle ilgilidir. Bu nedenle demiryolu bileşenlerinin üretimi ve arıza tespiti çok önemlidir (Sevi vd., 2022).

Demiryolu taşımacılığında raylar, hareket halindeki araçların (tren, vagon) tekerleklerine paralel olarak yerleştirilen metal çubuklardır. Bir demiryolu hattı birçok bileşenden oluşur (Sevi vd., 2022). Bir demiryolu hattının temel bileşenleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Demiryolu Hattının Temel Bileşenleri (Tacıroğlu, 2016).

Balastlı demiryolu hatları yapısal olarak altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısma ayrılır. Üst yapı, raylar, traversler, bağlantı elemanları, balast katmanları ve alt balast katmanlarından, altyapı ise sıkıştırılmış taban zemini ve formasyon katmanlarından oluşmaktadır (Tacıroğlu, 2016).

Demiryolu Üstyapısı

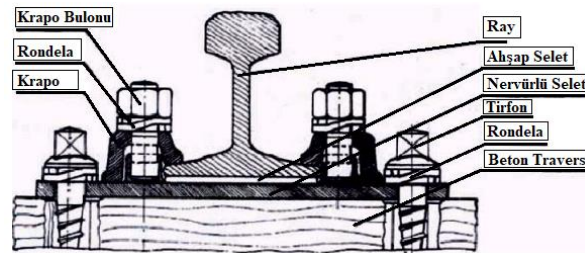
Demiryolu üst yapılarının temel rolü, tren yüklerini altyapının zarar görmemesi için dağıtmak ve rahatlatmaktır. Ray üstyapısının en üstünde bulunan raylar tekerlekleri yönlendirerek raylı taşıtın tekerlekleri için düşük dirençli bir hareket yüzeyi sağlar. Ayrıca dingillerden iletilen yükü traversler vasıtasıyla aşağıdaki katmanlara iletirler (Tacıroğlu, 2016).

Traversler, raydan gelen yükleri ve titreşimleri absorbe eden ve rayın şeklini koruyan altyapıya iletilmesinde büyük önem taşır. Raylı sistemlerde geçmişte ahşap ve çelik traversler kullanılmasına rağmen günümüzde dünyada en yaygın kullanılan traversler betonarme traverslerdir. Demiryolu işletme şartlarına göre değişmekle birlikte örneğin ülkemizin de üyesi olduğu UIC (Dünya Demiryolu Birliği) hatlarında traverslerde dünya çapında büyük bir tüketim söz konusudur. Traverslerin yoğun üretilmesinin nedenlerinden biri de önemli bir bölümünün beklenen 40-50 yıllık ömrüne ulaşamamasıdır (Çeçen & Aktaş, 2021).

Demiryolu üst yapısının traverslerinin konulduğu kırmataş tabakasına “balast” adı verilir. Çakıl balast olarak granit, yüksek fırın cürufu, bazalt, kireçtaşı, granüle ya da kırılmış kaya kullanılmaktadır. Tane yüzeylerinin hepsinin tamamen kırılmış olduğu ve demiryolu hatlarının inşasında kullanılan agregalar; yapay, doğal veya geri kazanılmış şekilde olabilmektedir (Yılmaz, 2015).

Rayları traverslere ve rayları birbiri ile bağlayan malzemelere küçük yol bağlantı malzemeleri denir. Rayı raya bağlayan küçük yol malzemeleri; cebire, rondela ve cebire bulonudur. Rayların birbirine bağlandıkları ek yerlerine conta denir. Rayların uçlarını birbirine bağlayan demir çubuklara cebire denir. Cebire bulonları gövde, baş ve somundan oluşur (Arlı, 2002).

Ray travers bağlantı malzemeleri ise; selet, krapo, travers bulonu, krapo bulonu, tirfon, ergodur. Ray tabanı ile travers arasına selet konur. Raydan gelen yükleri daha geniş bir yüzeye traverse iletir. Rayların devrilmesini önler ve ekartmanı muhafaza eder. Beton ve ahşap traversli yollarda rayı selet aracılığı ile traverse veya ray tabanını traverse bağlamak için tirfon kullanılmaktadır (Bilgiç, 2017). Bağlantılarına göre; ahşap travers, demir travers, blon-tirfon tipi, N tipi, K tipi ve HM tipi gibi travers çeşitleri bulunmaktadır. K tipi bağlantı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. K Tipi Bağlantı (Bilgiç, 2017).

Demiryolu Altyapısı

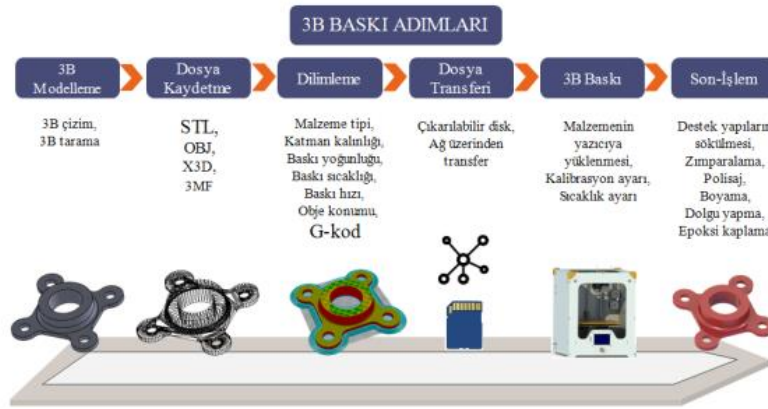
Beklenen hat kalitesinin ve işletme güvenliğinin sağlanması için demiryolu altyapısı çok önemlidir. Demiryolu altyapısının temel rolü, üstyapıdan aktarılan tren yüklerini taşımaktadır. Altyapı sadece sıkıştırılmış taban

zemininden oluştuğu gibi gerekirse taban zeminini üzerine bir formasyon katmanını inşa edilerek de oluşturulabilir. Formasyon tabakası ise taban zeminin yetersiz kaldığı durumlarda, üstü yapısı ile zemin arasına serilen tabakadır (Tacıroğlu, 2016).

EKLEMELİ İMALAT

Katmanlı (eklemeli) imalat metal, kompozit, plastik ve organik malzemeler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu (3B) geometrik verilerine göre oluşturulan katmanların üst üste eklenmesi ilkesine dayanan pratik bir üretim yöntemidir (Sürmen, 2019). Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, malzemeden tasarruf sağlayan bu yöntem aynı zamanda kalıpsız parça üretebilme ve karmaşık şekilli parçalar için bile yüksek derecede tasarım özgürlüğüne sahip olma avantajına sahiptir. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar genellikle düşük yoğunluk ve yüksek dayanım gibi iyi mekanik özelliklere sahiptir (Bozkurt vd., 2021).

Günümüzde, yaygın olarak 3B baskı olarak adlandırılan bu işlemin çatısı altında çeşitli teknolojiler bulunmaktadır. Ürünlerin farklı malzeme, mekanik ve geometrik özelliklerinden dolayı çeşitli eklemeli imalat teknikleri geliştirilerek ticarileştirilmekte ve biyomedikal, otomotiv, gıda, eğitim havacılık, medikal ve eğlence gibi sektörlerin hizmetine sunulmuştur. Hat kurulumu ve kalıp ihtiyacı olmadan, direkt tasarımdan üretime geçişe olanağı sağlayan 3B baskı işlemi genel olarak; 3B modelleme, dosya kaydetme, dilimleme, dosya transferi, 3B baskı ve son-işlem olmak üzere altı temel aşamadan oluşur (Şekil 3) (Sürmen, 2019).

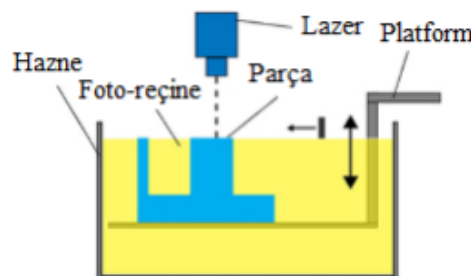


Şekil 3. 3B Baskı İşlem Basamakları (Sürmen, 2019).

Eklemeli imalat teknolojileri ISO/ASTM 52900:2015' e göre; bağlayıcı püskürtme, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, direk enerji biriktirme, toz yatağında birleştirme, sac laminasyon olmak üzere yedi kategoride sınıflandırılmaktadır (Başçı & Ymanoğlu, 2021). Katmanlı imalat yöntemleri için farklı ölçütlere dayalı sınıflandırmalar da bulunmaktadır.

Fotopolimerizasyon

Sıvı bir fotopolimer reçine tabakasının seçici bir şekilde ışınlar kullanılarak bir hazne içerisinde kürlenmesi prensibine dayanan sıvı bazlı bir işlemdir. Işının çarptığı bölgelerde polimerizasyon işlemi başlar ve bu bölgeler katılaştır. Platform daha sonra daha fazla katman oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. Bu döngü ürün ortaya çıkana kadar tekrarlanır ve son olarak reçine dolu hazne boşaltılarak ürün dışarı çıkarılır. Bu yöntemin hızlı üretim süreci, mükemmel yüzey kalitesi ve yüksek boyutsal doğruluk gibi avantajları vardır, ancak diğer yöntemlere kıyasla pahalı ve sarf malzeme olarak foto reçine kullanımı ile sınırlıdır (Şekil 4) (Şen, 2023).



Şekil 4. Fotopolimerizasyon Prosesi (Şen, 2023).

Malzeme Püskürtme

Malzeme püskürtme işleminde, platform üzerine damlacıklar halinde akıtılan malzeme tabakalar halinde katılaştırılarak parça oluşturulmaktadır. Sık kullanılan yöntemler arasında UV ışını ile sertleşen fotopolimer reçinenin püskürtülmesi veya oda sıcaklığında katılaştıran ısı olarak ergimiş malzemelerin püskürtülmesi teknikleri bulunmaktadır. Mum, polimer ve metal malzemeler kullanılarak bir veya daha fazla malzemedan yüksek boyutsal doğrulukta renkli parçalar üretilebilmektedir (Şen, 2023).

Bağlayıcı Püskürtme

Bu yöntemde toz besleme ünitesindeki tozlar üretim alanına bir tabaka kalınlığına kadar serilmekte ve tozun üzerine seçici olarak bağlayıcı reçine püskürtülmektedir. Püskürtme prosesi ile iki boyutta istenilen şekil elde edilir ve bir tabakada imalat işlemi tamamlanır. Son parçayı elde etmek için son katmana kadar işlem adımları tekrarlanır. Malzeme toz halinde olduğundan herhangi bir destek kullanımı gerektirmez (Saltık & Özsoy, 2020).

Malzeme Ekstrüzyonu (Eriyik Yiğma Modelleme)

Bu yöntemde yapının ham maddesi olan termoplastik malzeme, makaraya sarılan ince bir plastik filament şeklinde cihaza verilir. Bir dizi kontrollü düzenek aracılığıyla nozula beslenen filament, nozula ulaştığında termal olarak yarı erimiş bir duruma getirilir. Bilgisayar destekli imalat yazılımı ile iki eksende hareket ettirilebilen ekstrüzyon kafasından erimiş plastik malzeme sivri uçlu bir memeden dökülerek ince bir tabaka halinde yüzeye sıvanarak katmanlar oluşturulur. Her katmanda, platform bir adım aşağı iner, böylece parça tabakalar halinde oluşturulur. Erimiş malzeme yüzeye sıvandıkça sertleşir ve tüm katmanlar oluştuktan sonra parça tabladan kaldırılır. Gerekirse inşa sırasında destek görevi göreceği bir yapı da oluşturulur ve imalat tamamlandıktan sonra destek parçadan çıkarılır (Özsoy & Duman, 2017). Eriyik yiğma modelleme (FDM) olarak da bilinen bu yöntemde, inşa ve destek malzemesi olarak PLA ve ABS gibi yüzlerce polimer malzeme kullanılmaktadır.

Sac Laminasyon

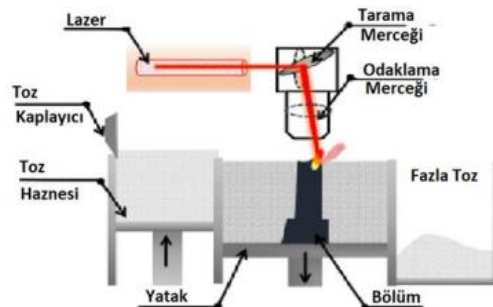
Bu yöntemde, sac halindeki hammaddeden, bilgisayar ortamında tasarlanmış parçaların kesici takım veya lazer kullanılarak aynı ölçülerde kesilmektedir. Sonrasında ise aynı şekilde kesilen ikinci katmanın ısı, kimyasal bağlayıcı, basınç, yapıştırıcı vb. ile üzerine bağlanması esasına dayanan hem çıkarma hem de ekleme yöntemidir. Hammadde olarak sac halindeki polimer, kompozit, metal, kâğıt vb. gibi malzemeler kullanılır (Yeşiloğlu, 2022).

Direkt Enerji Biriktirme

Bilgisayar ortamında tasarlanan parçaların tel veya toz halindeki hammaddelerden lazer ışını, elektron ışınları, ark gibi enerji kaynakları ile eritilerek bir önceki katmanla birleştirilmesi esasına dayanan katmanlı imalat yöntemidir. Benzer yaklaşımlarla sistemdeki lazer gücü, enerji tipi, toz iletim metodu, lazer boyutu ve geri besleme sistemi vb. noktalarda çeşitli yöntemlerin kullanıldığı birçok ticari ad bulunmaktadır (Yeşiloğlu, 2022).

Toz Yatağında Birleştirme

Bu yöntem genel olarak DMLS, elektron ışını eritme, SLS, multijet eritme, elektron ışını eritme ve seçici lazer eritme olmak üzere alt gruba ayrılmaktadır. Toz yataklı eritme yöntemlerinde, lazerler veya elektron ışınları tozları eritmek ve birleştirmek için kullanılır. Tüm toz yataklı eritme işlemlerinde, bir vakum gereklidir ve toz yatağının altındaki haznedan çıkan tozlar, bir silindir veya toz yayma pabucu kullanılarak ortalama 0,1 mm kalınlıkta bir toz katmanı inşa etme platformu üzerine serilir. Bu yayılan toz tabakasının lazerle sinterlenmesi ile ürünün ilk tabakası oluşturulur ve diğer tabakaları oluşturmak için aynı imalat çevrimi tekrarlanarak ürün elde edilir (Şekil 5) (Yalçın & Ergene, 2017).



Şekil 5. Toz Yataklı Eritme Prosesi (Çelebi & Koda, 2021).

DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİNDE EKLEMELİ İMALATIN KULLANILDIĞI ALANLAR

Demiryolu endüstrisinde eklemeli imalat genel olarak çeken ve çekilen araçları oluşturan parçalarda, demiryolu hattının altyapı ve üstyapı temel bileşenlerinin tasarım ve üretimi olmak üzere birçok kısmında kullanılmaktadır. Bu çalışmada da demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın kullanıldığı alanlar üç temel başlıkta ele alınmıştır.

Demiryolu Üstyapısında Eklemeli İmalatın Kullanımı

Demiryolu hatlarında yolcu ve yük taşınması için taşıtların hareket etmesini sağlayan temel bileşen olan demiryolu üstyapısı çok önemlidir. Demiryolu üstyapısı genel olarak; ray, balast, travers, bağlantı elemanları ve özel parçalardan oluşmaktadır.

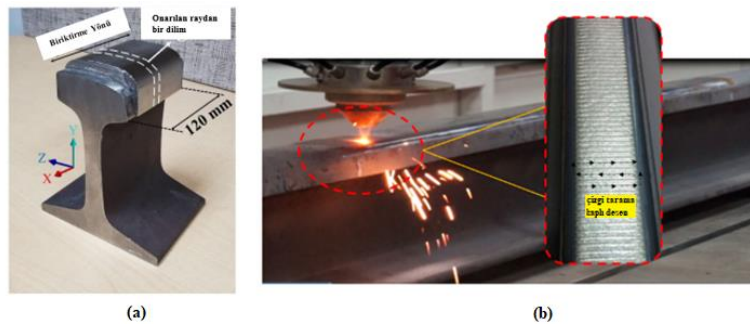
Ray

Raylar, demiryolu hatlarında trenlerin hareket ettiği yol yüzeyini oluştururlar. Böylece trenler, yükleri taşıırken düzgün ve güvenli bir şekilde ilerleyebilirler. Ancak, rayların kullanım süresi arttıkça aşınma, çevresel şartlar gibi durumlardan dolayı tamiri veya değişimi gerekli olmaktadır. Rayların değişimi daha maliyetli olacağı için öncelik rayların tamir durumu değerlendirilmektedir.

Ray aşınmasını ve yuvarlanma temas yorgunluğu direncini iyileştirmek için, lazer eritme olarak da adlandırılan seçici lazer eritme (SLM) katkılı üretim teknolojisi, birçok araştırmacı tarafından ray üst yüzeylerinde geliştirilmiş bir katman oluşturmak için benimsenmiştir. Lazer kaplama teknolojisi ise ilk olarak ray başı alanında güçlendirilmiş bir katman oluşturmak için kullanılmıştır. Geçmiş onarım teknolojisiyle karşılaştırıldığında, eklemeli imalat yalnızca yerel gerçek hasarı onarmakla kalmaz, aynı zamanda ray performansını iyileştirebilir ve ray hizmet ömrünü uzatabilir (Fu & Kaewunruen, 2022).

Geleneksel yöntemlerle rayların tamir ve bakımın gerçekleştirildiği gibi günümüzde eklemeli imalat ile de hasarlı rayların tamiri gerçekleştirilebilmektedir. ABD demiryolu ulaşım sisteminde kullanılan aşınmış rayları onarmak için metal eklemeli imalat (AM) teknolojisini kullanmıştır. Çalışma sonucunda, eklemeli imalat ile onarılan rayın ortaya çıkan mekanik ve metalürjik özelliklerinin sonuçları değerlendirilmiştir (Mortazavian, 2022).

Nellian ve Pang (2023) yaptıkları çalışmada ise, ray çeliği numunelerinin metal eklemeli imalatla onarımının lazer metal biriktirme karakterizasyonunu araştırmışlardır. Çalışmada, lazer metal biriktirme işlemi kullanılarak Stellite 6 tozu ile ray çeliği onarımına ilişkin araştırma yapmışlardır. Kobalt bazlı bir alaşım olan Stellite 6'nın, kafası sertleştirilmiş R350HT sınıfı ray çeliği alt tabakası ile biriktirilmiş malzeme uyumluluğunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, demiryolu çeliği bileşenlerinin lazer metal biriktirme işlemi ile kaplamalı onarımının, demiryolu çeliği onarım operasyonları için gelecekte kullanıma yönelik önemli bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir (Şekil 6) (Nellian & Pang, 2023).

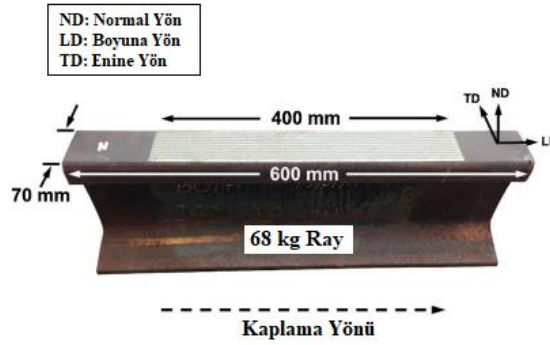


Şekil 6. a. Eklemeli İmalatla Tamir Edilmiş Ray (Mortazavian, 2022) b. Stellite 6, R350HT Ray Kafası Bölümünde Biriktirilme İşlemi (Nellian & Pang, 2023).

Bir ray üzerine, lazer ile ergitilmiş toz püskürtülerek yapılan dolgu işleminde rayın mekanik özellikleri, malzeme türünden, alaşım tozlarının tanecikli yapısından ve 3B baskı işlemlerinden etkilenmektedir. Kaplama tabakası, temel malzeme tipine göre Fe bazlı, Ni bazlı, Co bazlı ve diğer tiplerde sınıflandırılabilir (Fu & Kaewunruen, 2022).

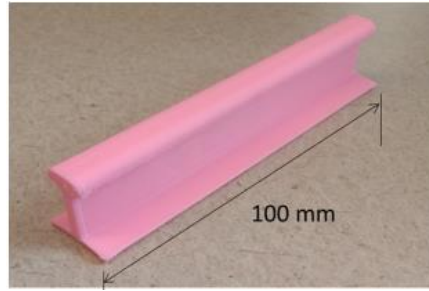
Lai vd., (2019) yaptıkları çalışmada, malzeme biriktirme, işleme parametreleri ve ısıtma koşullarının lazerle kaplanmış ötektoid üstü rayların malzeme özelliklerine etkisini incelemişlerdir (Şekil 7). Farklı kaplama malzemeleri ve işlem parametrelerinin karşılaştırmalı çalışması için 410L, 420SS, Stellite 6 ve Stellite 21'in tek ve çift biriktirmeli kaplama malzemeleri dikkate alınmıştır. Karşılaştırma amacıyla kaplamaların sabit kalınlığını sağlamak için enine

hız ve toz besleme hızı, sırasıyla 1000–1200 mm/dk ve 3–4 rpm aralıklarında eş zamanlı olarak değiştirilmiştir. Ray-tekerlek teması için en uygun kaplama malzemesi, yüzey kusurları, sertlik, mikroyapısal ve mekanik özellikler gibi tüm önemli hususlar değerlendirilerek belirlenmiştir (Lai vd., 2019).



Şekil 7. Lazerle Kaplanmış Ray Numunesi (Lai vd., 2019).

Çeşitli demiryolu araçları için de eklemeli imalatla ray üretimi gerçekleştirilmektedir. 3B baskı teknolojisi kullanılarak mikro insan taşıyan araçlar için demiryolu raylarının tasarımı ve prototipi araştırmacılar tarafından üretilmiştir. Prototipleme için FDM teknolojisi ve malzeme olarak PLA (polilaktit) seçilmiştir. Basılı rayların taşıma kapasitesini belirlemek için hem basma hem de eğilme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, beklendiği gibi, yük kapasitesinin ve hata modlarının, 3B yazdırılan parçaların fiber içeriğine ve katman yönlerine bağlı olduğunu göstermiştir (Şekil 8) (Chen vd., 2021).



Şekil 8. 3B Basılmış Demiryolu Rayı (Chen vd., 2021).

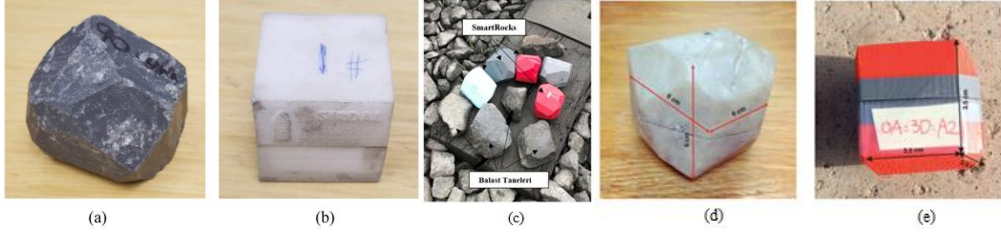
Balast

Balast parçacıkları dinamik tren yükleri altında hareket eder, döner ve birbirleriyle etkileşime girer ve sonra bozulur. Balastlı bir hattın bakımı, balastlı hattı yeterli sağlamlık ve elastikiyetle tutmak için önemlidir (Fu & Kaewunruen, 2022). Demiryolu hattı altyapısında, balastların hareketini incelemek için balast benzeri parçalar eklemeli imalat ile üretilmektedir.

Zeng vd., (2019) yaptıkları çalışmada, SmartRock ve patern tanımayı kullanarak balast durumu belirlenmiştir. Balast durumunun doğru ve zamanında izlenmesi demiryolunun güvenli işletimi ve etkili bakım açısından kritik öneme sahiptir. Çalışmada, farklı koşullar altında farklı balast hareket modellerini incelemek için üç farklı lokasyondaki laboratuvar testlerinde sekiz adet kablosuz gömülü cihaz (SmartRocks) kullanılmıştır. SmartRock'un kabuğunu oluşturmak ve onu gerçek bir balast şekline dönüştürmek için 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın güvenilir bir balast durumu tanımlama endeksinin geliştirilmesine yönelik bir ön adımı temsil ettiği ifade edilmiştir (Zeng vd., 2019).

Liu vd., (2019) yaptıkları çalışmada, çamur noktasında balast parçacık hareketinin karakterizasyonunu araştırmışlardır. 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen ve bir balast parçasını andıran pille çalışan kablosuz cihaz SmartRock, hareketini gerçek zamanlı olarak algılayıp kaydedebilmekte ve iletebilmektedir. Hem yük hem de yolcu trenleri altındaki parçacık hareketini araştırmak için her bölümdeki balast yataklarına SmartRocks yerleştirilmiştir. Sonuçlar, farklı yük trenleri altında temiz ve çamurlu noktalardaki bağlantı ve balast partikül hareketinin farklılıklarını göstermiştir. Test sonuçları, gelecekte büyük onarımları önlemek amacıyla ray üzerindeki potansiyel sorunlu yerleri belirlemek için kullanılabileceğini göstermiştir (Liu vd., 2019).

Liu vd., (2017) yaptıkları çalışmada, çift eksenli ve çok eksenli georidlerle stabilize edilmiş bir balast hattı yapısındaki parçacık hareketini karşılaştırmalı değerlendirmiştir. SmartRock'u bir balast parçacığı gibi şekillendirmek için üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılmıştır. Georidler genellikle demiryolu hattı alt yapısında, zayıf bir alt zemin üzerinde balast takviyesi ve stabilizasyon için kullanılır. Farklı açıklık şekilleri, benzersiz kilitleme mekanizması nedeniyle balast parçacıkları üzerindeki sınırlayıcı etkiyi etkiler. SmartRocks olarak bilinen dört kablosuz cihaz, balast-alt balast ve alt balast-alt zemin arayüzlerinde ray yatağının altına ve banketin altına gömülmüştür. Çalışmada, parçacık hareketinin azaltılması ve balast yüzeyinin düşey yer değiştirmesinin azaltılması da dahil olmak üzere çok eksenli bir georid tabakasına sahip olmanın avantajları tartışılmıştır (Liu vd., 2017). SmartRock parçalarının fotoğrafları Şekil 9'da verilmiştir.



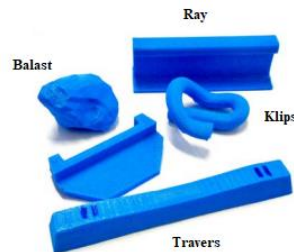
Şekil 9. SmartRock'un Fotoğrafları **a.** Büyük, Köşeli SmartRock **b.** Küçük Kübik SmartRock (Zeng vd., 2019) **c.** Balast Taneleri, SmartRocks (Liu vd., 2019) **d.** SmartRock'ın Ölçüleri Büyük Parça **e.** SmartRock'ın Ölçüleri Küçük Parça (Liu vd., 2017).

Ayrıca, Fereshenejad ve Song (2016) yaptıkları çalışmada, toz tabanlı 3B yazıcının kaya mekaniğinde fiziksel modellemeye uygulanabilirliği üzerine temel araştırma yapmışlardır. Çalışmada, kaya mekaniği uygulamaları için toz bazlı 3B yazıcı numunelerinin mekanik özelliklerindeki iyileştirmeler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda 3BP teknolojisi, kaya mühendisliği problemlerini çözmede büyük bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Fereshenejad & Song, 2016).

Travers

Ahşap traversler ve beton traversler için eklemeli imalat teknolojileri ile ilgili herhangi bir araştırma yapılmadığı görülmüştür. Ancak bazı araştırmacılar traverslerin şekil optimizasyonunu gerçekleştirmişler. Araştırma amaçlı karmaşık şekillere sahip prototip traversler, 3B baskı işlemi kullanılarak kolayca üretilebilmektedir (Fu & Kaewunruen, 2022).

Broekman ve Gräbe (2021) yaptıkları çalışmada, derin öğrenme demiryolu uygulamaları için sanal ortamların geliştirilmesini araştırmışlardır. Özellikle ulaşım uygulamaları için sağlam yapay zeka sistemlerinin geliştirilmesi büyük ölçüde etiketli büyük veri kümelerinin varlığına bağlıdır. Yapılan çalışmada, ticari olarak temin edilebilen bir 3B yazıcı kullanılarak, demiryolu bileşenlerinin her birinin kopyaları mavi renkli PLA filamentini kullanılarak basılmıştır (Şekil 10). Niteliksel değerlendirme için basılan bu parçalarda renk, ağırlık her bileşenin geometrik özelliklerini genelleştirme yeteneğini test etmek için özel olarak seçilmiştir. Çalışmada önerilen dijital iş akışı, son teknolojiye sahip sinir ağları için gereken veri kümelerinin geliştirilmesinde harcanan zamanı ve maliyeti önemli ölçüde azaltırken, bu modeller için gereken aslına uygunluğu ve gerçekçiliği de koruduğu ifade edilmiştir (Broekman & Gräbe, 2021).

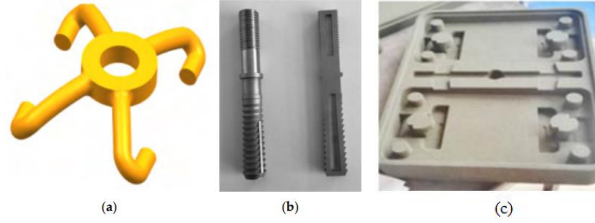


Şekil 10. Kalitatif Değerlendirme İçin 3B Basılı Parça Bileşenleri (Broekman & Gräbe, 2021).

Bağlantı Elemanları

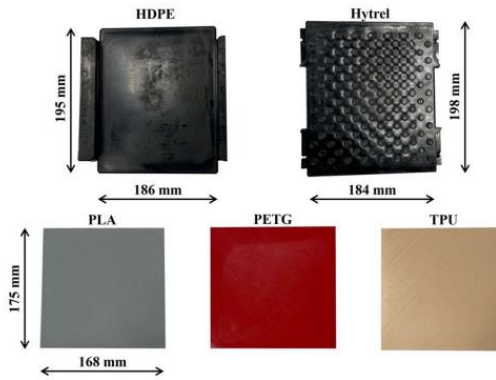
Demiryolu bağlantı elemanı sistemi, traversler veya ray döşemeleri üzerindeki rayların sabitlenmesine yardımcı olur ve raylar için esneklik sağlar (Fu & Kaewunruen, 2022). Demiryolu hatlarında çok sayıda bağlantı elemanı kullanıldığı için maliyet açısından geometrik optimizasyonu da önemlidir. Bu sebeple vida ve klips gibi bağlantı

parçalarının optimizasyonu için eklemeli imalat kullanılmaktadır (Şekil 11a-11b). Ayrıca, bağlantı elemanlarının rayın sabitlenmesinde yardımcı olduğu için dayanımı da önemlidir. Bağlantı elemanı çelik levhası ise döküm yöntemiyle üretilmektedir. Ancak bu parçanın dökümünün yapılabilmesi için kum kalıp gerekmektedir. Karmaşık geometrilere sahip metal parçaların dökümü için 3B baskılı kum kalıplar eklemeli imalat ile üretilmektedir (Şekil 11c).



Şekil 11. Demiryolu Bağlantı Elemanlarının Optimizasyonu **a.** Klips, **b.** Vida **c.** Bağlantı Elemanı Çelik Levhası İçin 3B Baskılı Kalıplar (Fu & Kaewunruen, 2022).

Ray altı yastığı, rayların alt kısmını desteklemek için demiryolu hatlarının altına yerleştirilen bir bileşendir. Ray altı yastığı parçası çeşitli malzemeler kullanılarak 3B yazıcılar ile üretilmektedir. Van Schalkwyk ve Gräbe (2022) yaptıkları çalışmada, uygun maliyetli bir akıllı ray altı yastığı kullanarak tren tekerleklerinin durum izlemesini araştırmışlardır. Çalışmada, yaygın olarak bulunan ivmeölçerler ve bir gerinim ölçer ile gömülü bir 3B baskılı ray altı yastığı kullanan tren tekerleklerinin durumunun izlenmesine odaklanmışlardır. Akıllı ray altı yastığı için en uygun malzemeyi belirlemek üzere çeşitli 3B baskı malzemeleri (PLA, PETG ve TPU) üzerinde ve HDPE, Hytrel malzemeleri üzerinde bir dizi malzeme testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 12) (Van Schalkwyk & Gräbe, 2022).



Şekil 12. Test Edilen Ray Altı Yastıklarının Ölçüleri (Van Schalkwyk & Gräbe, 2022).

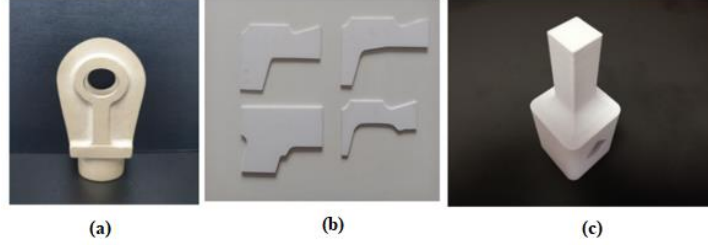
Özel Parçalar

Eklemeli imalat ile demiryolu hatlarında kullanılan çeşitli özel parçalar (braket, elektrik hat kelepçesi, sensör, gösterge vb.) tasarlanarak üretilmiştir. 3B baskı teknolojisini kullanan akıllı demiryolu uygulaması için RFID tabanlı pilsiz sensör düğümü araştırılmıştır. RFID anteninde dielektrik mürekkepli PCB ve gümüş mürekkep olmak üzere iki farklı malzeme ile 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır (Chim vd., 2019).

Lee ve Jung (2022) yaptıkları çalışmada, demiryolu elektrifikasyonunda havai hat bileşenleri için 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretim sürecinin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak havai hat bileşenleri için bir üretim süreci önerilmiştir. Bunun için yüksek hızlı demiryolu için klevis uç kelepçesi seçilmiş ve 3B tarama ile tasarım çizimi oluşturulmuştur. Kalıplar, kum kalıba döküm için bağlayıcı püskürtme 3B yazıcı yöntemi, hassas döküm için ise SLA (Stereolitografi) yöntemi kullanılarak eklemeli imalat teknolojisiyle üretilmiştir (Şekil 13a). 3B baskı kullanılarak kum kalıpla üretilen kelepçenin boyutlarının ölçüm değerleri, kurutma işlemi ve hacim azalması nedeniyle 3B modele göre daha düşük bulunmuştur. Ancak 3B baskı kullanarak izin verilen hata aralığında hızlı bir şekilde kelepçeler üretmenin mümkün olduğu belirtilmiştir (Lee & Jung, 2022).

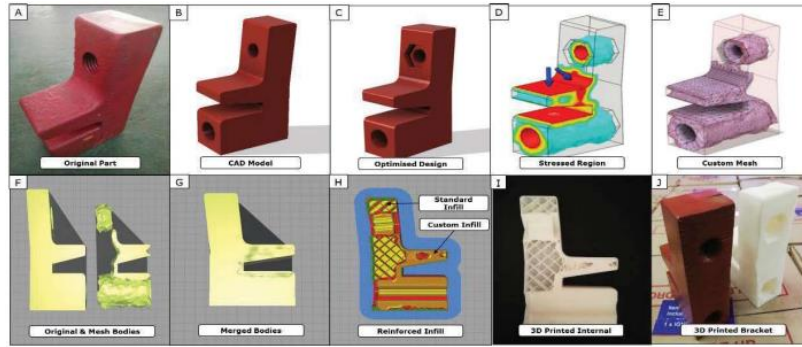
Kalibrasyon göstergeleri, bakım faaliyetleri gerçekleştirilirken demiryolu altyapısında yaygın olarak kullanılır. Gösterge, profili eski haline getirmek için taşlama müdahalelerinin gerekli olup olmadığı konusunda yol personelini bilgilendirir. Katmanlı üretim, tasarım mühendislerinin, yol bakım faaliyetlerine yardımcı olmak için talep üzerine bu göstergeleri yeniden üretmelerine olanak tanır (Şekil 13b) (Toth vd., 2022).

Ray kenarı ekipmanı, demiryolu altyapı varlıklarının izlenmesini ve bozulmaya karşı korunmasını sağlamak için kullanılır. Yol kenarı yağlayıcıları gibi yol kenarı ekipmanları, trenler geçerken ray üzerinde bir gres tabakası sağlar. Bu sayede aşırı aşınma önlenir. Eriyik biriktirme modelleme teknolojisi, etkili kalibrasyon için özel aletler, yedek parçalar ve ölçüm göstergeleri oluşturmak için kullanılır. Bakım amacıyla mekanik yağlayıcıyı açmak için özel olarak tasarlanmış bir alet Şekil 13c’de gösterilmiştir (Toth vd., 2022).



Şekil 13. a. Döküm Kelepçe (Lee & Jung, 2022) b. Ray Profili Göstergesi c. Yağlayıcı Bakım Takımı (Toth vd., 2022).

Toth ve Vilakazi (2019) yaptıkları çalışmada, demiryolu altyapı ortamında mekanik tasarıma yardımcı olmak için 3B baskılı parçalarda güçlendirilmiş mesh ve malzeme testinin faydalarını araştırmışlardır. Ayrıca vaka çalışmasında, optimal olarak 3B yazdırılmış bir gres plakası braketini özel olarak oluşturulmuş takviyeli bir dolgu geometrisi oluşturma teknikleri ve yöntemleri gösterilmiştir. Gres plakası braketini, demiryolunda yol kenarındaki yağlayıcı parçası olarak kullanılmakta olduğu belirtilmiştir. 3B baskılı optimize edilmiş yağ plakası braketinin vaka incelemesi sonucunda, özel bir dolgu geometrisi oluşturmanın 3B baskılı parçanın, reel uygulamalar için güçlendirilmesine yardımcı olabileceğini göstermiştir (Şekil 14) (Toth & Vilakazi, 2019).



Şekil 14. Özel Güçlendirilmiş Dolgu Geometrisi Kullanarak Yol Kenarı Yağlayıcı Braketini 3B Yazdırma (Toth & Vilakazi, 2019).

Demiryolu Altyapısında Eklemeli İmalatın Kullanımı

Üç boyutlu baskı beton teknolojisi, 3 boyutlu baskılı sivil binalar ve köprüler gibi büyük 3 boyutlu baskılı yapılara izin verir, ancak baskı ekipmanının sahaya yerleştirilmesi gerekmektedir. 3B baskılı evlerin ve köprülerin arsa alanları yüzlerce metrekare mertebesinde olup, şantiye daha çok şehir merkezinde levha zeminler üzerine kuruludur. Bu altyapılardan farklı olarak, demiryolu hatlarının uzunluğu çok daha fazladır ve demiryolu altyapısının çoğu dağ tünellerinde, yer altı tünellerinde, köprülerde ve açık banliyölerde bulunur. Saha koşulları, 3B baskı makinelerinin hazırlanmasını ve yerleştirilmesini zorlaştırmaktadır (Fu & Kaewunruen, 2022).

Pan vd., (2021) yaptıkları çalışmada, inşaatta 3B baskının son teknoloji ve uygulamalarını araştırmışlardır. İnşaatta 3B baskının en son teknolojiye uyarlanmasının genel bir haritası sunulmuş ve hem teknik hem de teknik olmayan bakış açılarından teknolojinin hazırlığı değerlendirilmiştir. Çalışmada, Sincan'ın başkenti Wulumuqi'deki yüksek hızlı tren istasyonunun meydanında yer alan dört benzersiz şekilli yapının, 3B baskı ile yapılan çelikte güçlendirilmiş beton levhalardan meydana geldiği ifade edilmiştir. Ayrıca, 3B baskının inşaat uygulamalarında kullanımı hakkında çeşitli proje örnekleri de verilmiştir (Pan vd., 2021).

Köprü, İstinat Duvarı ve Menfez

Yapılan araştırmalarda, eklemeli imalat ile üretilen köprü ve istinat duvarı gibi altyapı elemanlarının genellikle karayolları için üretildiği görülmektedir. Salet vd. (2018) yaptıkları çalışmada, “test ederek tasarım” konseptini uygulayarak 3B baskılı beton köprü yapmışlardır. Hem yapısal hem de inşaat açısından kapsamlı bir test prosedürü

takip edilmiştir. Olası sorunları ve tehlikeleri belirlemek için montaj denemeleri yapılmıştır. Çalışmada, bir kamu trafik ağında güçlendirilmiş bir 3B beton baskılı köprüsünü gerçekleştirirken karşılaşılan zorlukları ve bunların üstesinden gelmek için alınan çözümleri bütünsel olarak tartışmışlardır (Salet vd., 2018).

İncelenen araştırmalarda eklemeli imalat ile karayolları veya yaya yolları için ufak boyutlara sahip köprüler yapılabildiği görülmektedir. Demiryolları için ise eklemeli imalat boyutsal sınırlar ve üretim yeri gibi sebeplerden dolayı köprü üretiminin zor olduğu görülmektedir. Feucht vd. (2021) yaptıkları çalışmada, çelikle 3B baskı: bir köprünün yerinde eklemeli imalatını araştırmışlardır. Çalışmada, TU Darmstadt'ta tel ve ark tabanlı bir eklemeli üretim süreci kullanılarak çelikten yerinde 3 boyutlu bir yaya köprüsü yazdırılmıştır (Şekil 15a). Bu projeye dayanarak, büyük çelik yapıların yerinde eklemeli imalatının mümkün olduğu gösterilmiştir (Feucht vd., 2021).

Ancak gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yöntemiyle daha dayanıklı ve büyük boyutlu köprüler yapılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, eklemeli imalat ile üretilen beton bloklarının demiryolları için köprü yapımında da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Demiryolu altyapı elemanlarından biri olan menfezler demiryolları için çok önemlidir. Menfez, demiryolu hatları ile yol trafiğini ve diğer ulaşım sistemlerini güvenli tutmak ve etkileşimleri kontrol etmek için kullanılmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda bu yapıların eklemeli imalat ile üretilebildiği görülmektedir. Şekil 15b'de eklemeli imalat ile üretilen menfeze sahip istinat duvarı gösterilmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile beton bloklarının üretimi sayesinde bu blokların istinat duvarı olarak demiryollarında da kullanılabileceği öngörülmektedir.

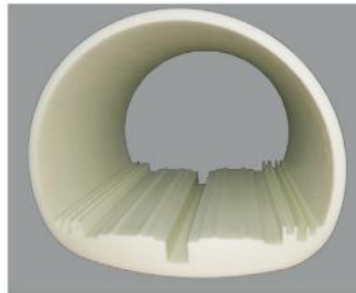


Şekil 15. a. 3B Yazdırılan Çelik Köprü (Feucht vd., 2021) b. 3B Baskı İle Üretilen Menfezli İstinat Duvarı (Cambridge Üniversitesi, t.y.).

Tünel

Tünellerin inşaatının, üretim yeri sınırları ve yüksek maliyetli olması sebebiyle eklemeli imalat ile üretiminin zor olduğu görülmektedir. Ancak, çeşitli drenaj, rüzgar vb. testleri için FDM eklemeli imalat teknolojisi ile prototip mini tüneller üretilerek çeşitli analizler yapılabilmektedir.

Li vd., (2022) yaptıkları çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak farklı drenaj sistemleriyle çalışan demiryolu tünellerinin invert stabilitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Son yıllarda, su zengini bölgelerde demiryolu tünellerinin işletilmesinde ters anomaliler sıklıkla ortaya çıkmakta ve bu durum demiryolu hatlarının taşıma kapasitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Tünel drenaj sistemi, harici su basıncını düzenleyerek ters stabilizeyi sağlamak için çok önemli bir faktördür. Çalışmada, üç boyutlu (3B) bir baskı modeli aracılığıyla, Çin'de yaygın olarak kullanılan geleneksel drenaj sistemi (TDS) ve alttan drenaj işlevine sahip optimize edilmiş drenaj sistemi (ODS) ile tüneller için invert deformasyon davranışını deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 16) (Li vd., 2022).

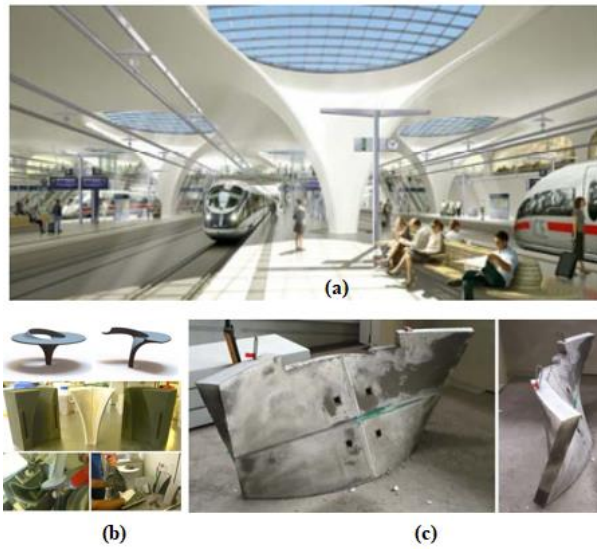


Şekil 16. 3B Baskılı Tünel Yapı Modeli (Li vd., 2022).

İstasyon

Tren istasyonlarının inşaatının eklemeli imalat ile üretimi ise karmaşık ve yüksek maliyetli olmasına rağmen Alman demiryolu şirketinin projesi kapsamında hedeflenmektedir. Proje kapsamında, 3B yazıcılarla beton blokları ve diğer kısımlarının üretimi ve daha sonra bu parçaların birleştirilmesi ile tren istasyonu üretimi amaçlanmaktadır.

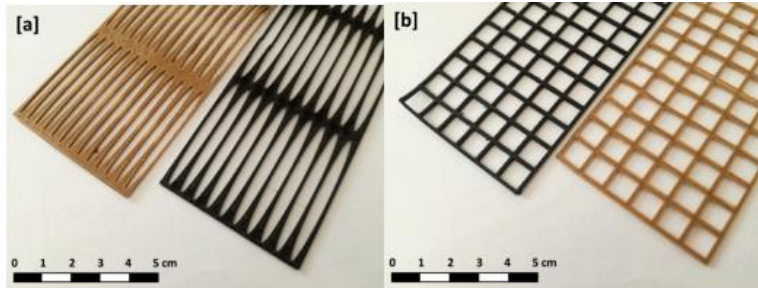
Teizer vd., (2016) yaptıkları çalışmada, inşaatta karmaşık geometrik şekillerin büyük ölçekli 3B baskısını incelemiştir. Çalışmada, “Stuttgart 21” ana merkez tren istasyonu inşaat projesinin tasarımından ve öneminden bahsedilmiştir. İstasyon tasarımında, optimize edilmiş kabuk yapısının, yani karmaşık parabolik beton kolonların kalınlığı, açıklığın yüzde birine düşürülerek inşaat için çok daha az malzeme kullanılması sağlanmıştır. Yaptıkları çalışmada, küçük ve büyük ölçekli test modelleri oluşturulmuştur. Küçük ölçekli test de kolonun basitleştirilmiş bir 3B modeli oluşturulmuş ve iki kum kalıp parçasına bölünmüştür. Sonrasında bir kalıp sistemi olarak işlev görecektir şekilde birleştirilmiş ve beton kalıplara dökülerek kalıp çıkarılmış ve ürün oluşturulmuştur. Büyük ölçekli test ise, ana istasyondaki bir parabolik beton kolonun ayrıntılı eleman ve kalıp tasarımının yanı sıra inşa edilebilirlik planlaması şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 17) (Teizer vd., 2016).



Şekil 17. a. Parabolik Beton Kolonlu “Stuttgart 21” Ana İstasyonu Tasarımı b. Parabolik Beton Kolonun Küçük Ölçekli Üretimi c. 3B Baskılı Kalıp Elemanlarının Çıkarılmasından Sonra Beton (Teizer vd., 2016).

Ses Bariyerleri ve Georidler

Demiryolu hattı altyapısında gürültüyü azaltmak için ses bariyerleri bileşenleri bulunmaktadır. Ses bariyerleri raylı sistem araçlarının hareketi sırasında oluşan gürültü sorununu ortadan kaldırmak için önemli bir parçadır. Ayrıca, balast etkileşimini artırmak için georidler, balast hareketini kısıtlamak için istinat duvarları ve kumları bloke etmek için kum koruma duvarları gibi sahalardaki belirli sorunları ele almak için demiryolu hattı altyapısı bazı özel bileşenler içerir (Fu & Kaewunruen, 2022). Balast etkileşimini artırmak için kullanılan georidler farklı malzeme ve tasarımlarla 3B yazıcılar ile üretilebilmektedir (Şekil 18).



Şekil 18. n-PLA (Siyah) ve h-PLA (Kahverengi) 3B Baskı İle Üretilen Georidler a. Tek Eksenli Georid, b. İki Eksenli Georid (Cislaghi vd., 2021).

Demiryollarında raylı sistem araçlarından, yüksek hızda ve ray-tekerlek teması gibi durumlardan dolayı gürültü oluşmaktadır. Bu sebeple demiryollarında gürültünün azaltılması için ses bariyerlerinin tasarımı önem

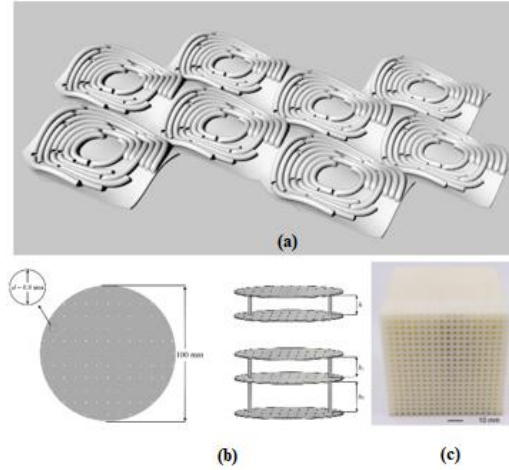
kazanmaktadır. Eklemeli imalat ile karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi mümkündür. Ses bariyerlerinin tasarımı, optimum gürültü azaltmanın sağlanması için karmaşık geometriye sahip olabilmesi sebebiyle eklemeli imalat ile üretimi avantaj sağlamaktadır.

3B baskılı ses bariyerinin gürültüyü yaklaşık 30 dB kadar etkili bir şekilde azaltabileceği ve gürültü azaltma etkisinin geleneksel teknolojiyi kullanan ses bariyerinden daha belirgin olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 19) (WinSun, t.y.).



Şekil 19. Ses Bariyerleri (WinSun, t.y.).

Trafik akışının yoğun olduğu hem demiryollarında hem de karayollarında gürültü problemini ortadan kaldırmak için 3B yazıcı ile çeşitli ses bariyerleri tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmektedir (Şekil 20). Günümüzde ses bariyerlerinin kullanımının artan trafik yoğunluğu ile birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 20. a. 3B Yazıcıda Üretilmiş Gürültü Emiciler (Setaki vd., 2023) b. Gürültü Emme Optimizasyonu İçin 3B Yazıcıda Üretilen Mikro Delikli Panelin Şematik Gösterimi (Yang vd., 2020) c. 3B Yazıcıda Üretilmiş 20 Tüp Ağ Katmanına Sahip Ses Emici (Zhao vd., 2021).

Raylı Sistem Araçlarında Eklemeli İmalatın Kullanımı

Çeken ve çekilen araçları oluşturan parçalarının bir kısmının eklemeli imalat ile üretilmiş olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, raylı sistem araçları birçok parçadan oluştuğu için eklemeli imalat ile üretilen tren ve vagon parçalarını tek tek açıklamaktan ziyade raylı sistem araçlarını oluşturan parçaların üretiminde eklemeli imalatın hangi amaçlarla kullanıldığı araştırılarak ifade edilmiştir. Eklemeli imalat raylı sistem araçlarında genellikle; prototip parça üretimi, yedek parça üretimi, karmaşık kafes yapı tasarımı, parça basitleştirme, kalıp üretimi ve parça tamiri gibi amaçlarla kullanılmaktadır.

Killen vd., (2018) yaptıkları çalışmada, iç ray bileşenlerinin tasarımına, imalatına ve bakımına alternatif bir yaklaşım sunarak eklemeli imalat kullanımının keşfedilmesini araştırmışlardır. Çalışmada, Alman Demiryolları'nın, artık büyük ölçekli üretimde olmayan, ICE yüksek hızlı trenlerinin ilk nesilleri olan eski filoları için 3B baskılı parçalara sahip olduğu belirtilmiştir. Eski filolardaki parçaların değiştirilmesi, artık üretilmeyebilecekleri ve bu nedenle geleneksel üretim teknikleri kullanılarak yeniden üretilmesi pahalı olabileceğinden, pahalı ve karmaşık bir süreç olabilmektedir. Eklemeli imalat, artık üretilmeyen parçalar için takım veya kalıp üretiminin ön maliyetini de ortadan kaldırmaktadır. Eklemeli imalatın kullanımı, Alman Demiryolları ağında ve filusunda tasarım güncellemelerini prototipleme ve deneme için de kullanılmıştır. Havalandırma menfezleri ve yatay damper konsolları gibi mühendislik parçaları eklemeli imalat kullanılarak basılmıştır. Bölgesel demiryolu filosu koltukları için yeni koltuk

başlıkları ve tirabzanlarda görme engelliler Braille tabelası gibi müşteri etkileşimini içeren tasarım parçaları da basılmıştır (Killen vd., 2018).

Yedek Parça Üretimi

Yıllar önce üretilen ürünlerin yedek parçaların günümüzde bulunması zor olabilmektedir. Bu sebeple hasarlı parçaların hızlı ve ucuz bir şekilde değiştirilebilmesi için yedek parçaların eklemeli imalat ile üretimi önemlidir. Ayrıca, günümüzde üretilen özel tasarım parçaların hızlı bir şekilde temin edilmesinin gerektiği durumlarda da 3B yazıcılar ile parça üretimi sağlanabilmektedir.

Hohenwarter vd., (2020) yaptıkları çalışmada, polikarbonat (PC) ve poliaktik asit (PLA) kullanımının demiryolu uygulamalarında yanıcılık özelliklerine 3B baskının etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, 3B baskı yoluyla Polikarbonat polimerinden yapılmış şeffaf bileşenlerin üretimine odaklanmıştır. Sınırlı üretim sayıları nedeniyle, demiryolu bileşenlerinin üretiminde katmanlı imalat kullanılmasının daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada polimer, farklı alev geciktirici maddeler kullanılarak modifiye edilmiş ve baskı parametrelerinin, özellikle de baskı yoğunluğunun etkisi belirlenmiştir. Çeşitli uygulamalar için farklı boyutlarda LED armatürün 3B basılmış uç kapaklarının görseli Şekil 21a'da verilmiştir (Hohenwarter vd., 2020).

Eklemeli imalatın demiryolu endüstrisindeki diğer bir avantajı da, talep üzerine iş bağlama düzenini oluşturan aparatlar gibi yardımcıları üretebilme yeteneğidir. Şekil 21b'de tren boji bakımında kullanılan birincil bağlantı aracı bir eklemeli imalat işlemiyle üretilmiştir (Wu vd., 2023).



Şekil 21. a. Demiryolu Araçlarında LED Armatürlerin 3B Basılmış Plastik Uç Kapakları (Hohenwarter vd., 2020)
b. Bir Trende Eklemeli İmalatlı Boji Konnektörü (Wu vd., 2023).

Toth vd., (2022) yaptıkları çalışmada, nihai fonksiyonel demiryolu aracı tavan hava girişi ve havalandırma yedek parçalarının eriyik biriktirme modelleme teknolojisi ile üretilmiştir. Ayrıca, eriyik biriktirme modelleme teknolojisi, enjeksiyonla kalıplanmış bileşenleri güçlendirmek için bazı tasarım öğeleri eklerken dişli mekanizmaları için yeni yedek plastik kapaklar oluşturmak için kullanılmıştır. Eklemeli imalat teknolojisinin kullanılması, daha önce enjeksiyonla kalıplanmış tek seferlik değiştirmelerin oluşturulması için daha ucuz ve daha hızlı bir yöntem sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma ile 3B baskı teknolojisinin demiryolu ile ilgili uygulamaların eski bileşenleri için yeni ve optimize edilmiş yedek parçalar oluşturabileceğini göstermiştir (Toth vd., 2022).

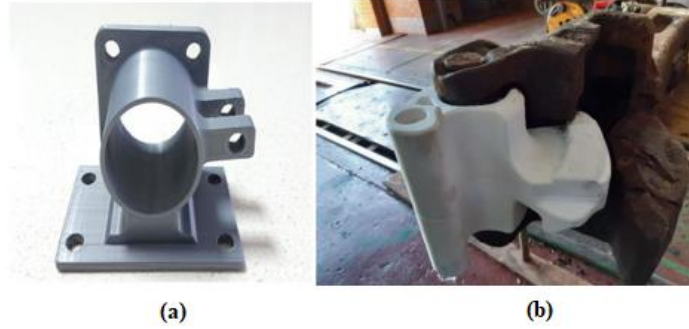
Parça Basitleştirme ve Prototip Üretimi

Karmaşık bileşenler genellikle kaynaklama, cıvatalama, sert lehimleme vb. yöntemlerle birleştirilen çok sayıda basit parçadan oluşur. Ancak, tek bir parçayla karşılaştırıldığında, bu tür tertibatlar daha düşük performans sergilemekte ve daha yüksek muayene ve bakım maliyetleri içermektedir. Eklemeli imalat teknolojileri, parçanın performansını artırarak ve daha hafif bir yapı oluşturarak toplam parça sayısını azaltabilir (Wu vd., 2023).

Parça sayısını azaltmak için uygulanabilir bir yaklaşım, imal edilen parça sayısını azaltan montaj-parça konsolidasyonudur. Metal ve polimer eklemeli imalat teknolojilerinin avantajlarından yararlanarak ve eklemeli imalat için tasarım tekniklerini uygulayarak, montaj-parça birleştirilmiş demiryolu ürünlerinin yeni tasarımları üretilir. Demiryolu inceleme aracında bulunan mevcut tekerlek yatağı süspansiyon muhafazası, tek bir düzenek oluşturmak için dokuz ayrı parçanın kullanıldığı geleneksel yöntemler kullanılarak üretilmiştir. Eklemeli imalat için tasarım teknikleri ve eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak, tekerlek yatağı süspansiyon muhafazası prototipi, minimum destek yapıları gerektiren yazdırılabilir tek bir konsolide nesne olarak tasarlanmış ve eklemeli imalat teknolojisi ile prototip üretilmiştir (Şekil 22a) (Toth vd., 2022).

Hoosain vd., (2020) yaptıkları çalışmada, demiryolu endüstrisinde eklemeli imalat ile ilgili vaka çalışması incelemişlerdir. Vaka çalışmasında, iki vagonu birbirine bağlamak için kullanılan ve sistemin parçası olan mafsalın

ağırlığı optimize edilerek SLS eklemeli imalat yöntemiyle bir prototip üretilmiştir (Şekil 22b). Yapılan çalışmanın, temel işlevselliği etkilemeden çok daha hafif bir parça tasarlanmasının mümkün olduğunu ve üretim kısıtlamaları dikkate alınarak kullanılabilir bir parçanın üretilebilmesini sağlamak için hâlâ bir miktar tasarım iyileştirmesinin gerekli olduğunu kanıtlamak için yapıldığı ifade edilmiştir (Hoosain vd., 2020).



Şekil 22. a. 3B Baskılı Prototip (Toth vd., 2022) b. Mafsal Prototip Üretimi (Hoosain vd., 2020).

Wang vd., (2022) yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı demiryolu fren diskleri için 3B baskı dıştan olarak güçlendirilmiş katmanlar: SLM işlemlerinin gradyan malzemelerinin üretimi için uyarlanabilirliğini araştırmışlardır. Yüksek hızlı demiryolu fren diski için yarı sürekli oranlı gradyan alaşımlı çelik, seçici lazer eritme (SLM) ile hazırlanmıştır. Kendi tasarladığı bileşime sahip aşınmaya dayanıklı paslanmaz çelik, dış güçlendirme katmanı olarak kullanılmıştır. Gradyan alaşımlı çelik numunesi, gradyanlar arasında iyi bir metalurjik bağa sahip olduğu ve bileşimin eşit şekilde değiştiği; bunun, daha sonraki aşınma direnci ve korozyon direnci analizi için iyi bir temel oluşturacağı belirtilmiştir (Wang vd., 2022).

Karmaşık Kafes Yapı Üretimi

Eklemeli imalat teknolojisi, kafes yapılarının topoloji için optimize edilmiş yapılarda kullanılmasını sağlamaktadır. Geleneksel katı yapılarla karşılaştırıldığında, kafes yapılar, daha yüksek özgül güç ve özgül sertlik, aynı zamanda titreşim azaltma, gürültü azaltma ve darbe direnci sunan daha iyi malzeme kullanımı sunmaktadır. Nitekim hızlı tren gövde taban ve etek saclarında alüminyum petek paneller ve kompozit sandviç paneller kullanılmıştır. Bu bağlamda, eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu yüksek derecede tasarım özgürlüğü, kafes yapılardan yararlanma olanaklarını önemli ölçüde genişletir (Wu vd., 2023).

Parça Tamiri

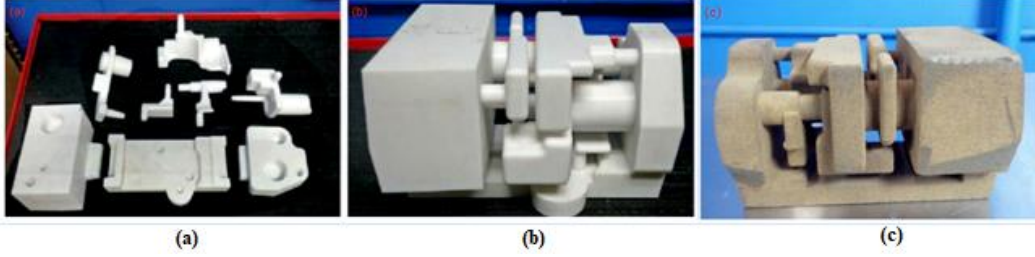
Demiryollarında rayların eklemeli imalat ile tamir edildiği gibi çeken ve çekilen araçları oluşturan parçaların da eklemeli imalat ile tamiri de mümkündür. Demiryolu dingillerinin montajı, boşaltılması, işletilmesi ve bakımı sırasında tekerlek yuvaları, dişli yuvaları, dingil kirişleri ve dingillerin diğer parçaları çizilmelere, eziklere ve aşınmaya maruz kalır. Hasarın göz ardı edilmesi, raydan çıkma da dahil olmak üzere tren operasyonlarının güvenliği için yakın bir tehdit oluşturan akslarda yorulma arızasına yol açabilir. Hasar derinliği belirli bir değeri aşarsa dingil hurdaya ayrılır. Bu nedenle, hasarlı dingilleri onarmak için dingil yenileme teknolojisinin geliştirilmesi demiryolu işletme maliyetlerini azaltabilir ve kaynak kullanımını iyileştirebilir (Wu vd., 2023). Bu sebeple hasarlı dingilleri tamir için lazer kaplama prosesi uygulanabilmektedir.

Kalıp Üretimi

Demiryolu dingil kutuları için muhafazalar ve kapaklar gibi öğeler genellikle kum döküm kullanılarak üretilmektedir. Eklemeli imalat, özellikle prototiplerin ve alet parçalarının üretimi için çok uygundur (Wu vd., 2023). Özellikle karmaşık geometriye sahip ters açılı parçaların üretimi geleneksel kum kalıpta döküm yöntemi ile üretimi zordur. Bu sebeple bu tür parçaların dökümü için eklemeli imalat ile kum kalıpların üretilmesi gerekmektedir.

Kang ve Ma (2017) yaptıkları çalışmada, 3B baskı teknolojilerinin dökümdeki rolü ve etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, bir trenin hava freni için geleneksel olarak sekiz farklı çekirdekten dönüştürülen tek bir çekirdek gibi, fırınlanmayan veya soğuk kutu sistemlerindeki çoklu çekirdekler, azaltılmış istifleme toleransları ve iyileştirilmiş boyutsal doğrulukla bir 3B yazıcıyla tek bir parça halinde basıldığı belirtilmiştir (Şekil 23a-23b). Çalışma sonunda, 3B baskı teknolojilerinin, hızlı prototiplemeden hızlı kalıplamaya, hızlı üretime ve hızlı döküme doğru geliştiği ifade edilmiştir. Ayrıca, katmanlı üretim yönteminin, tasarımcılara çok daha fazla tasarım özgürlüğü sağlamanın yanı sıra yüksek verimlilik ve daha düşük maliyet sağladığı belirtilmiştir (Kang & Ma, 2017).

Almaghariz vd., (2016) yaptıkları çalışmada, kalıplar ve maçalar için 3B kum baskı kullanımında parça tasarımı karmaşıklığının rolünün belirlenmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada, parça tasarımı karmaşıklığına ve bunun çeşitli üretim hacimleriyle ilişkisine dayalı olarak 3 boyutlu kum baskısının ekonomik fizibilitesi için karar kriterleri geliştirilmiş ve vaka çalışmaları kullanılarak gösterilmiştir. Vaka çalışması olarak tren hava freni ve turboşarj parçaları incelenmiştir. Kompleks şekilli tren hava freninin dökümü için 3B kum baskılı maça görseli verilmiştir (Şekil 23c) (Almaghariz vd., 2016).



Şekil 23. a. Soğuk Kutu Maça, Sekiz Farklı Parça, **b.** 3B Baskı İle Maça, Tek Parça (Hava Freni Dökümü İçin Maçaların Tek Bir Parça Halinde Entegrasyonu) (Kang & Ma, 2017) **c.** Tren Hava Freninin Dökümü İçin 3B Kum Baskılı Maça (Almaghariz vd., 2016).

SONUÇLAR

Bu çalışmada eklemeli imalat yönteminin tanımı yapılarak avantajları ve dezavantajları ifade edilmiştir. Günümüzde demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın hangi alanlarda kullanıldığı belirtilerek demiryolu endüstrisinde kullanımının artırılıp artırılmayacağı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda, demiryolu endüstrisinde birçok alanda eklemeli imalatın direkt veya dolaylı olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yönteminde kullanılan malzeme çeşidinin çoğalması, üretim hızının ve üretim kalitesinin artması sebebiyle eklemeli imalatın ilerleyen zamanlarda demiryolu endüstrisinde kullanımının daha yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Yüksek dayanım, hafif tasarım, düşük maliyetli üretim ve tasarım özgürlüğü gibi avantajlar sayesinde eklemeli imalatın modern üretim yöntemleri arasında özellikle tasarım, yedek parça üretimi, tamir ve optimizasyon açısından öne çıkmaktadır. Metal eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesiyle birlikte direkt parça üretiminin de kolaylaşması raylı sistemlerde kullanılan metal parçaların üretimi için de önemli bir avantajdır. Bu çalışma ile demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın kullanıldığı alanlar açıklanarak akıllı demiryolu hattı inşa edebilmek için eklemeli imalatın benimsenmesi ve kullanım potansiyelinin artırılması sağlanmaya çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B., & Fang, M. (2016). Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240-252. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0027-5>

Arlı, V. (2002). Balastlı ve Balastsız Üstyapıların Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul

Ayyıldız, R., & Eyigün, Y. (2020). Raylı Sistem Araçlarının Yerleştirilmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 107-120.

Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>

Bilgiç, Ş. (2017). *Demiryolu*. OGÜ, Ders Notu. <https://web.ogu.edu.tr/Storage/akalin/Uploads/demiryolu-dersnotu-1-2017.pdf> Erişim 01.06.2023

Bozkurt, Y., Gülsoy, H., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.902023>

Broekman, A., & Gräbe, P. J. (2021). Development of virtual environments for deep learning railway applications. *SAHHA Technical Conference 2021 Proceedings*.

Cambridge Üniversitesi. (2023). 3B beton istinat duvarı ve menfez. <http://www.eng.cam.ac.uk/news/cambridge-researchers-help-develop-smart-3d-printed-concrete-wall-national-highways-project> Erişim 21.08.2023,

Chen, S.-E., Shanmugam, N. S., Boyajian, D., Chavan, V. S., Weber, E., & Baarsons, K. (2021). Prototyping rail track for micro-people movers using additive manufacturing: Failure topology characterization. *Construction and Building Materials*, 281, 122623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122623>

Chim, Y. Y., Leung, M. H. F., Ni, Y. Q., & Tsang, E. C. L. (2019). RFID Based Battery-Free Sensor Node for Smart Railway Application using 3D-Printing Technology. *2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/FLEPS.2019.8792251>

Cislaghi, A., Sala, P., Borgonovo, G., Gandolfi, C., & Bischetti, G. B. (2021). Towards More Sustainable Materials for Geo-Environmental Engineering: The Case of Geogrids. *Sustainability*, 13(5), 2585. <https://doi.org/10.3390/su13052585>

Çeçen, F., & Aktaş, B. (2021). Yeni Nesil Demiryolu Traversleri ve Yerli FRP Donatı Kullanımının Deneysel Araştırması. *Demiryolu Mühendisliği*, 13, 53-64. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>

Çelebi, A., & Koda, Y. (2021). Endüstri 4.0 Çerçevesinde Katmanlı İmalatta Sensör Uygulamaları. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(1), 85-97. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.837635>

Fereshtenejad, S., & Song, J.-J. (2016). Fundamental Study on Applicability of Powder-Based 3D Printer for Physical Modeling in Rock Mechanics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6), 2065-2074. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0904-x>

Feucht, T., Waldschmitt, B., Lange, J., & Erven, M. (2021). 3D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of a Bridge in situ. *Ce/Papers*, 4(2-4), 1695-1701. <https://doi.org/10.1002/cepa.1475>

Fu, H., & Kaewunruen, S. (2022). State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. *Journal of Composites Science*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>

Gündüz, A. Y., Kaya, M., & Aydemir, C. (2011). Kentiçi Ulaşımında Karayolu Ulaşımına Alternatif Sistem: Raylı Ulaşım Sistemi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 2(1), 134-151.

Hohenwarter, D., Fischer, C., & Berger, M. (2020). Influence of 3D-Printing on the Flammability Properties of Railway Applications Using Polycarbonate (PC) and Polylactic acid (PLA). *Problemy Kolejnictwa - Railway Reports*, 64(187), 99-107. <https://doi.org/10.36137/1874E>

Hoosain, S. E., Tshabalala, L., Bester, D., Chetty, D., & Mukwevho, G. (2020). Additive manufacturing case study in the railway industry. *Proceedings of the Rapid Product Development Association of South Africa (RAPDASA)*, 80-86.

Kabasakal, A., & Solak, A. O. (2009). Demiryolu Sektörünün Rekabete Açılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25.

Kang, J., & Ma, Q. (2017). The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry*, 14(3), 157-168. <https://doi.org/10.1007/s41230-017-6109-z>

Killen, A., Fu, L., Coxon, S., & Napper, R. (2018). Exploring the use of Additive Manufacturing in Providing an Alternative Approach to the Design, Manufacture and Maintenance of Interior Rail Components. *Australasian Transport Research Forum 2018 Proceedings*, 30.

Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., Soodi, M., & Wu, X. (2019). Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rails. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.035>

Lee, K., & Jung, H. (2022). An improvement of manufacturing process using 3D printing technology for overhead line components on railway electrification. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(5), 3085-3091. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01209-w>

Li, L., Yang, J., Fu, J., Wang, S., Zhang, C., & Xiang, M. (2022). Experimental investigation on the invert stability of operating railway tunnels with different drainage systems using 3D printing technology. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(5), 1470-1485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.013>

Liu, S., Huang, H., Qiu, T., & Kerchof, B. (2019). Characterization of Ballast Particle Movement at Mud Spot. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(1), 04018339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002545)

Liu, S., Huang, H., Qiu, T., & Kwon, J. (2017). Comparative Evaluation of Particle Movement in a Ballast Track Structure Stabilized with Biaxial and Multiaxial Geogrids. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2607(1), 15-23. <https://doi.org/10.3141/2607-04>

Mortazavian, E. (2022). Mobile 3D Printing of Rail Track Surface For Rapid Repair. Ph.D. Thesis. University of Nevada Department of Mechanical Engineering, Las Vegas.

Nellian, A. S., & Pang, J. H. L. (2023). Laser metal deposition characterization study of metal additive manufacturing repair of rail steel specimens. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2134042. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2134042>

Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14.

Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.

Pan, Y., Zhang, Y., Zhang, D., & Song, Y. (2021). 3D printing in construction: State of the art and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5-6), 1329-1348. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07213-0>

Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>

Saltık, O., & Özsoy, A. (2020). Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalatta Kullanılan Bağlayıcılar. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 3(1), 10-18.

Setaki, F., Tian, F., Turrin, M., Tenpierik, M., Nijs, L., & Van Timmeren, A. (2023). 3D-printed sound absorbers: Compact and customisable at broadband frequencies. *Architecture, Structures and Construction*, 3(2), 205-215. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00086-9>

Sevi, M., Aydın, İ., & Karaköse, M. (2022). Derin Öğrenme Yöntemleri ile Demiryolu Bağlantı Elemanlarının Sınıflandırılması. *European Journal of Science and Technology*, 35, 268-274. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1029905>

Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>

Şen, M. (2023). Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen Parçaların Kaynakla Birleştirilmesi ve Analizi. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul

Tacıroğlu, M. V. (2016). Demiryolu Hat Oturmasının Matematiksel Modelleri ve Hat Oturmasına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(3), 239-246. <https://doi.org/10.21923/jesd.49727>

Teizer, J., Blickle, A., King, T., Leitzbach, O., & Guenther, D. (2016, Temmuz 21). *Large Scale 3D Printing of Complex Geometric Shapes in Construction*. 33th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn, AL, USA. <https://doi.org/10.22260/ISARC2016/0114>

Toth, A. D., Padayachee, J., Mahlatji, T., & Vilakazi, S. (2022). Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry. *Scientific African*, 16, e01219. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01219>

Toth, A. D., & Vilakazi, S. (2019). Benefits of Reinforced Meshing and Materials Testing of 3D Printed Parts to Assist Mechanical Design In The Railway Infrastructure Environment. *RAPDASA 2019 Conference Proceedings*.

Van Schalkwyk, M. H., & Gräbe, P. J. (2022). Condition monitoring of train wheels using a cost-effective smart rail pad. *Engineering Research Express*, 4(3), 035045. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac87ec>

Wang, X., Zhang, S., Wang, Z. Y., Zhang, C. H., Wu, C. L., & Wang, M. (2022). 3D printing externally reinforced layers for high-speed railway brake discs: Adaptability of SLM processes for manufacturing gradient materials. *Materials Today Communications*, 31, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103778>

WinSun (2023). 3B baskılı ses bariyerleri. http://www.winsun3d.com/En/News/news_inner/id/569 Erişim 31.07.2023

Wu, Z., Wu, S., Qian, W., Zhang, H., Zhu, H., Chen, Q., Zhang, Z., Guo, F., Wang, J., & Withers, P. J. (2023). Structural integrity issues of additively manufactured railway components: Progress and challenges. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107265. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107265>

Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 9(3), 65-88.

Yang, Bai, Zhu, Kiran, An, Chua, & Zhou. (2020). 3D Printing of Polymeric Multi-Layer Micro-Perforated Panels for Tunable Wideband Sound Absorption. *Polymers*, 12(2), 360. <https://doi.org/10.3390/polym12020360>

Yeşiloğlu, R. (2022). Eklemeli İmalat ile Üretilen Farklı Dolgu Geometrisi ve Yoğunluğa Sahip PLA Esaslı Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük

Yılmaz, A. (2015). Demiryolu Üstyapısında Balast Kirliliği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 11-17.

Zeng, K., Qiu, T., Bian, X., Xiao, M., & Huang, H. (2019). Identification of ballast condition using SmartRock and pattern recognition. *Construction and Building Materials*, 221, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.049>

Zhao, T., Chen, Y., Zhang, K., & Hu, G. (2021). Tunable network sound absorber based on additive manufacturing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150(1), 94-101. <https://doi.org/10.1121/10.0005507>